VOL. 40, Nº 2 DICIEMBRE 2015 ISSN 0717-2915

Revista Journal SELPER

Misiones

Imagen de satélite Lansat ETM+

REVISTA JOURNAL

SOCIEDAD LATINOAMERICANA DE PERCEPCION REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACION ESPACIAL • SOCIEDADE LATINO-AMERICANA EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO ESPACIAI • LATINAMERICAN SOCIETY ON REMOTE SENSING AND SPACE INFORMATION SYSTEM

SELPER

VOL. 40 Nº 2 | Diciembre 2015 | ISSN 0717-2915

FOTO PORTADA

Misiones

Subescena correspondiente a la imagen224/078, su fecha de adquisición corresponde al 4 de octubre de 2009 del Landsat 7 ETM+. En ella se pueden observar los diferentes colores que imprime el Falso Color Compuesto Standar. La represa de Itaipú, sobre el río Paraná, domina el norte de la subescena, en tanto la selva Paranaense, hace lo mismo al sur. Serpenteando desde el este, el río Iguazú da lugar a las famosas Cataratas, declaradas Patrimonio de la Humanidad y una de las Siete Maravillas Naturales del mundo. En la unión de estos dos ríos se encuentran las ciudades de Puerto Iguazú, Foz de Iguaçu y Ciudad del Este, que hermanan las repúblicas de Argentina, Brasil y Paraguay, respectivamente. Fuente: CONAE.

EJEMPLAR DE DISTRIBUCION GRATUITA. PROHIBIDA SU VENTA

DIRECTORIO SELPER, SEDE MEXICO 2014- 2016
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
Cra. 8 #40-62, Bogotá, Chapinero, Colombia
Tel. +57 1 3239300
Lrocha@selper.org

PRESIDENTE
Luz Angela Rocha Salamanca
Colombia

VICE-PRESIDENTE
Laurent Durieux
Francia

VICE-PRESIDENTE
Miriam Esther Antes
Argentina

RESPONSABLE DE DIVULGACIÓN ELECTRÓNICA
Rafael Galeano
Colombia

COMITÉ DE RELACIONES INTERNACIONALES
Olga Piedad Rudas (Colombia)
Presidente interina
Laurent Durieux – Francia
Marie Jose Lefevre Fonollosa - Francia
Jean Francoise Mas Caussel- Mexico
Maurizio Fea - Italia
Anyul del Pilar Mora - Colombia
Washintong Franca Rocha - Brasil
Victor Barrena - Perú
Ramiro Salcedo - Venezuela

COMITÉ EDITORIAL
María Cristina Serafini (Argentina)
Presidente
Fabián Lozano – México
Laercio Massaru Namikawa - Brasil
Silvia Casas - Mexico
Javier Fuentes - Colombia
Freddy Flores – Venezuela

COMITÉ DE EDUCACIÓN
Maria Antonia García Cisnero (Cuba)
Presidente
Rosa Maria Aguilar- Venezuela
Laura Delgado - Venezuela
Alvaro Enrique Ortiz Davila - Colombia
Joselisa Ma. Chávez - Brasil
Luz Angela Roca Salamanca - Colombia

COMITÉ DE PROYECTOS INTERNACIONALES
Paulo Roberto Martini (Brasil)
Presidente
Federico Gonzalez Alonso – España
Alfredo Cuello – Argentina
Pedro Luis Garcia – Cuba
Maria Antonia Garcia – Cuba
Roberto Castro Rios – Chile

CAPÍTULOS CONSTITUIDOS

ARGENTINA
Miriam Esther Antes
Universidad Nacional de Luján (PRODITEL)
Fuerza Aérea Argentina (CSR)
Cruce Rutas 5 y Ex. 7 (6700)
Luján, Buenos Aires, Argentina
Tel: 54 - 2323- 420380 - int. 248
Fax: 54 - 2323- 425795
E-mail: selperargentina@gmail.com

BRASIL
Laércio Massuru Namikawa
INPE
Av. Dos Astronautas 1758, Sao José dos Campos
San Pablo, Brasil
Tel: 55 - 12-39456000
E-mail: laercio@dpi.inpe.br

CHILE
Hector Gutierrez Mendez
E-mail: hector.gutierrez@cenia.cl

COLOMBIA
Luz Angela Rocha Salamanca
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
Cra. 8 #40-62, Bogotá, Chapinero, Colombia
Tel. +57 1 3239300
E-mail: lrocha@selper.org

CUBA
Pedro Luis García Pérez
Sede UNAICC, Humboldt No. 104,
Esquina a Infanta, Vedado, La Habana, Cuba
Telf.: (5 37) 8363447
E-mail: lgarcia@ch.unaicc.cu

ECUADOR
Cor. Ricardo Urbina
CLIRSEN
Edif. Instituto Geográfico Militar, Piso 4
Seniergues s/n y Paz y Miño
Apartado Postal 17-08-8216
Quito, Ecuador
Tel.: 593- 2- 254-3193
Fax: 593- 2- 255-5454
E-mail: ricardo.urbina@clirsen.com

GUATEMALA
Carlos Alberto Duarte
Ingeniería Virtual
Ruta 4, 6-49 Zona 4, Oficina 14
Ciudad de Guatemala (01004), Guatemala
Tel: 502 - 334-1039/4038
Fax: 502 - 331-9390
E-mail: chduarte@hotmail.com

GUYANA FRANCESA
Laurent Polidori
Directeur de Recherche IRD / US ESPACE 140
Institut de Recherche pour le Développement (ex-ORSTOM)
Route de Montabo - BP 165 - 97323 Cayenne cedex
Tel. (+594) 594 29 92 81
Fax (+594) 594 31 98 55
E-mail:polidori@cayenne.ird.fr

MÉXICO
Jean Francois Mass
UNAM Campus Morelia
Morelia, Michoacan, México
E-mail: jfmas@ciga.unam.mx

HAITI
Jean Vernet Henry
Universidad de Haiti
E-mail: recteur@ueh.edu.ht

URUGUAY
Antonio Alarcón
Servicio de Sensores Remotos
Aeroespaciales Fuerza Aérea Uruguaya
Ruta 101 s/n Km. 19500
Carrasco, Canelones, Uruguay
Tel.: 598 -2 601 4083
Fax: 598 -2 601 4090
E-mail: aalarconv@hiotmail.com

VENEZUELA
Freddy Flores
E-mail: freddyf@fii.gob.ar

PERÚ
Victor Barrena Arroyo
Universidad Nacional Agraria La Molina
Av. La Universidad s/n
La Molina, Lima, Perú
Tel / Fax: 51-1-349-5647 anexo 232/349-2041
E-mail: vbarrena@lamolina.edu.pe

CAPÍTULOS ESPECIALES

ALEMANIA
Klaus Reiniger
DLR
D-8031 Oberpfaffenohfen
Alemania
Tel: 49- 8153- 281.189
Fax: 49- 8153- 281.443

CANADÁ
Fritz P. Dubois
25 Nidland
Crs Nepean Ontario Kh2-8n2
Ontario, Canadá
Tel: 613- 596-4164
Fax: 613- 723-9626

ESPAÑA
Jose Antonio Sobrino
Universidad de Valencia
E-mail: jose.sobrino@uv.es

HOLANDA
Carlos Valenzuela
ITC
350 Boulevard 1945, P.O.X. 6. 7500 AA
Enschede, Holanda
Tel.: 31 53 874-444
Fax: 31 53 874-400

ITALIA
Francesco Sarti
ESA/ESRIN
Via Galileo Galilei, s/n
I-00044 Frascati, Italia
Tel: 39 - 694180409
Fax: 39 - 694180602
E-mail: Francesco.Sarti@esa.int

FRANCIA
Marie Jose LefevreFonollosa
Centro Nacional de Estudios Espaciales
E-mail: marie-jose.lefevre@cnes.fr

USA
Patricia M. Ravelo
SPOT
Estados Unidos
Tel: 1-800-ask-spot ext. 137
Fax: 703-648.1813
E-mail: ravelo@spot.com

COMITÉ EDITORIAL

María Cristina Serafini (Argentina)
PRODITEL
Universidad Nacional de Luján
Cruce rutas 5 y ex 7
(6700) Luján, Buenos Aires, Argentina
Tel: 54-2323-423171 int 248
Fax: 54-2323-425795
E-mail: proditel@mail.unlu.edu.ar

Laercio Massaru Namikawa (Brasil)
E-mail: aercio@dpi.inpe.br

Silvia Casas (Mexico)
E-mail: silvia.casas757@gmail.com

Fabián Lozano (Mexico)
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Av. Euganio Garza Sada # 2501 sur, Col. Tecnológico, Monterrey, Nuevo León, México
Tel: 52 - 81 - 8358 - 1400 ext 5275
Fax: 52 - 81 - 8358 - 6280
E-mail: dflozano@itesm.mx

Javier Fuentes (Colombia)
E-mail: hjavierf@gmail.com

Freddy Flores (Venezuela)
Fundación Instituto de Ingeniería
Carretera Vieja de Baruta, Sector Sartenejas, Urb. Monte Elena II
Caracas, Venezuela
Tel: 58 2-903 4661-4610
Fax: 58 2- 903 4780
E-mail: freddyf@fii.org

COMITÉ DE EVALUADORES

Graciela Marin
(SEGEMAR - Argentina

Walter F. Sione
(UNLu / UADER - Argentina)

Mirta Raed
(UBA - Argentina)

ÍNDICE TEMÁTICO

- **EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIAL NORMALIZADO (NDVI) PARA EL COMPLEJO FLUVIO LITORAL DEL RÍO PARANÁ (2010-2013) EN BASE A IMÁGENES MODIS (MOD13Q1)**

  Zamboni Lisandra Pamela

  Sione Walter Fabián

  Tentor Fernando Raúl

  Aceñolaza Pablo Gilberto.....

- **APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE GLACIARES**

  María de los Ángeles Tesoniero

  Matías Caso 16

- **LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA Y LA EVALUACION MULTICRITERIO COMO METODOLOGIA PARA LA LOCACION ÓPTIMA DE CAMPOS DE GENERADORES DE ENERGIA EOLICA.CASO DE ESTUDIO: PROVINCIA DE SAN JUAN**

  Márquez, Eduardo Jaime

  Del Cid, María Concepción

  Velazquez, Laura

  Martinez, Mirtha

  López, Juan Manuel.....24.....

- **EVIDENCIAS DE TELECONEXIÓN ENTRE EL ENOS Y LA FENOLOGÍA DE PASTIZALES TEMPLADOS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES UTILIZANDO SENSORES REMOTOS**

  Lara, Bruno

  Gandini, Marcelo .....35..

Editado por: SELPER Internacional
Universidad Nacional de Luján
Rutas 5 y ex 7, (6700) Luján - Bs. As. - ARGENTINA

EJEMPLAR DE DISTRIBUCIÓN GRATUITA PROHIBIDA SU VENTA

PLAN EDITORIAL SELPER 2014 - 2016

PLAN EDITORIAL SELPER

A partir de las decisiones adoptadas en el marco del XIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, llevado a cabo en La Habana, Cuba, en setiembre de 2008, la edición de la Revista SELPER está disponible en la página de nuestra Sociedad: http://www.selper.org.

En esta oportunidad hacemos llegar la publicación del Volumen 40 Número 2, donde se incluyen trabajos que han sido presentados en las Jornadas Argentinas de Geotecnologías, organizadas por la Universidad Nacional de Luján, la Universidad Nacional de San Luis y la Sociedad de Especialistas en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER), llevadas a cabo en San Luis, en setiembre de 2015.

NORMAS PARA LOS AUTORES

Los artículos recibidos serán enviados a tres (3) expertos en la temática para su revisión. Los trabajos aprobados serán publicados en estricto orden, de acuerdo a las fechas de llegada de las contribuciones.

Los idiomas oficiales SELPER son: Español, Portugués e Inglés.

Los trabajos deberán estructurarse contemplando las siguientes secciones:

a) Título del trabajo. Nombre de los autores y direcciones completas

b) Resumen (no más de 150 palabras) indicando al final las palabras claves. Deberá incluirse en Español o Portugués, además de Inglés

c) Introducción

d) Objetivos

e) Metodología empleada y materiales

f) Resultados obtenidos

g) Conclusiones

h) Bibliografía: sólo se incluirá la citada en el texto. Se indicarán los autores, por orden alfabético, año, título, revista o medio donde fue publicado, incluyendo volumen y páginas, cuando corresponda.

Los títulos y subtítulos de cada sección deberán estar claramente indicados (ya sea con numeración o tamaño de letras). Las tablas, fotos y figuras deberán ser suficientemente nítidas, llevar un título y estar numeradas en forma consecutiva.

Se deberá enviar una copia del trabajo en formato Word y una copia papel. La extensión total del trabajo no deberá superar las 12 páginas, (DIN-A4).

Los trabajos se enviarán a: editorial@selper.org

EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIAL NORMALIZADO (NDVI) PARA EL COMPLEJO FLUVIO LITORAL DEL RÍO PARANÁ (2010-2013) EN BASE A IMÁGENES MODIS (MOD13Q1)

Zamboni Lisandra Pamela[1], Sione Walter Fabián[1,2], Tentor Fernando Raúl[1] y Aceñolaza Pablo Gilberto[3]

[1] Centro Regional de Geomática. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Autónoma de Entre Ríos. España y Materi SN. CP3105. Diamante. Entre Ríos. Argentina. pamelazamboni@gmail.com
[2] Depto de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Luján
[3] Centro de Investigaciones Científicas y de Transferencias de Tecnología a la Producción. CICyTTP-CONICET Diamante. España y Materi SN. CP3105. Diamante. Entre Ríos. Argentina. acenolaza@gmail.com

RESUMEN

El uso del suelo y su cobertura juegan un rol crítico en la interacción entre la tierra y la atmósfera, influyendo en el clima a escala local, regional y global. Sus cambios temporales afectan las condiciones económicas, sociales y biofísicas de cada territorio. El Complejo Fluvio Litoral del Río Paraná (CFLRP) ha sido escenario de importantes cambios en el uso de la tierra, en especial debido a la introducción de ganado, exclusión en otros sitios, la modificación del drenaje a escala local, entre otros procesos de cambio. Esta situación ha aumentado la presión sobre los ecosistemas de la región generado cambios en la estructura de la vegetación, la biomasa y la carga combustible. Los cambios en la cobertura del suelo pueden ser estudiados mediante el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI). El producto MOD13Q1 (Modis/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V5) proporciona imágenes para la región desde enero de 2000. Las imágenes se encuentran pre-procesadas y corregidas, y se pueden descargar de forma gratuita desde el sitio del USGS- Earth Explorer (http://earthexplorer.usgs.gov/). El producto MOD13Q1 brinda la posibilidad de continuidad para aplicaciones históricas de series de tiempo. Para el procesamiento de las series temporales de imágenes (STI) se utilizó el móduloEarth Trends Modeler (ETM) del TerrSet. El ETM permite analizar, evaluar y modelar tendencias y patrones dentro y entre STI; identificar los ciclos y recurrencias así como completar información faltante; disminución de ruidos y anomalías. Así, el objetivo de este trabajo fue "analizar la evolución del NDVI en diferentes tipos de cubiertas vegetales del CFLRP a partir de la serie de datos temporales del producto MOD13Q1 para el período 2010-2013" (92 fechas). Para este trabajo se realizaron las siguientes actividades: descarga, almacenamiento, construcción de mosaicos (MOD13Q1 h12v12 y h13v12), recorte, agrupamiento (stack), y construcción de series temporales de NDVI. A fin de acotar los análisis, se construyeron a partir de vectores disponibles como resultados de clasificaciones previas realizadas para el área de estudio, una serie de máscaras de diferentes tipos de coberturas (bosques, arbustales, pajonales, pastizales (altos-bajos), pradera de herbáceas y suelo con baja cobertura). Se utilizaron la herramientas "initial" y "rastervector" de TerrSet para la construcción de las máscaras. Se analizaron las series temporales, los perfiles espectrales, tendencias y relaciones entre las series para cada tipo de cobertura. Estas técnicas permitieron conocer el comportamiento de los diferentes tipos de cobertura vegetal del CFLRP y sus tendencias intranuales e interanuales.

Palabras claves: Serie temporal, Earth Trends Modeler (Terrset), coberturas vegetales, teledetección.

ABSTRACT

Land cover and land use plays a critical role in the interaction between land and the atmosphere, influencing the climate at local, regional and global scale. Their temporal changes affect economic, social and biophysical conditions of each territory. The Parana River Fluvial/Littoral Complex (CFLRP) has developed significant changes in land use, particularly due to the introduction of livestock and modification of flooding patterns, among other processes. This has increased the pressure on ecosystems, shifting vegetation structure, biomass and fuel load. Changes in land cover can be studied using the normalized differentiated vegetation index (NDVI). The product MOD13Q1 (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 SIN Global Grid 250m V5) provides images for the region since January 2000. These images are pre-

processed and corrected, and can be downloaded for free from the site Earth Explorer-USGS http://earthexplorer.usgs.gov/. The MOD13Q1 product offers the possibility to study historical time series. The "Earth Trends Modeler (ETM)" package has been generated by Clark laboratory for the analysis of the time series images (STI). The ETM allow analyzing, evaluating and modeling trends and patterns within and between STI; identify recurrences, cycles and also completing missing information; decreasing noises and abnormalities. Thus, the objective of this article was to "analyze the evolution of NDVI in different types of land cover classes of the CFLRP for 2010-2013".The methodologies consisted in download, storage and processing MOD13Q1 data, and build a time series of NDVI. For the analysis, land cover class vectors available for the region were used. A number of different types of masks cover (forests, shrublands, grasslands, and aquatic plants) were identified. "Initial" and "rastervector" tools of IDRISI-TerrSet software were used to building masks. Time series, the spectral profiles, trends and relationships between sets for each type of coverage was analyzed. These techniques allowed us to know the behavior of different types of CFLRP plant cover types, and intra or inter-annual trends.

INTRODUCCION

El uso del suelo y su cobertura juegan un rol crítico en la interacción entre la tierra y la atmósfera, influyendo en el clima a escala local, regional y global. Estos cambios pueden ser estudiados mediante herramientas geomáticas (Brown *et al.,* 2014). La teledetección permite obtener información espacial a diferente resolución; construir series de tiempo y analizar variables ambientales de forma no destructiva. Una de las técnicas de amplio uso es la construcción de índices que permiten estudiar entre otros procesos, la actividad del componente vegetal. El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) posibilita la vigilancia de las condiciones de la vegetación, y cambios de cobertura terrestre y puede utilizarse para la caracterización de las propiedades de la superficie terrestre y de procesos biofísicos, incluyendo la producción primaria y la conversión de la cobertura del suelo. NDVI (Tucker y Sellers 1986)= (ρ ir - ρr) / (ρir +ρr), donde: ρ= reflectividad en el Rojo y ρir= Reflectividad en el Infrarrojo.

El producto MOD13Q1 (Modis/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V5) (Solano *et al*., 2010) proporciona imágenes cada 16 días desde enero de 2000 a una resolución espacial de 250 mts, en proyección sinusoidal. Este producto contiene entre sus bandas el índice de vegetación normalizado (NDVI). Las imágenes (Nivel L3) se encuentran pre-procesadas y corregidas, y se pueden descargar de forma gratuita desde el servidor de cartografía del USGS- Earth Explorer (http://earthexplorer.usgs.gov/). El producto MOD13Q1 brinda información espacial y temporalmente consistentes para la comparación de las condiciones de la vegetación (Solano et al., 2010).

El desarrollo de las plataformas satelitales permite que actualmente se cuente con series de datos de períodos de varios años y generada a intervalos regulares. El paquete Earth Trends Modeler (ETM) ha sido generado por Clark Labs, (Clark University) para el análisis de series temporales de imágenes (STI). El ETM permite analizar, evaluar y modelar tendencias y patrones dentro y entre STI; identificar los ciclos y recurrencias así como completar información faltante; disminución de ruidos y anomalías.

A partir de clasificaciones preliminares (Sione *et al.,* 2008, 2009; Zamboni *et al.,* 2008; Salvia, 2010; Zamboni *et al*., 2014, Aceñolaza *et al.,* 2014) para el CFLRP, se cuenta con mapas de coberturas del suelo para toda la región. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue "analizar la evolución del NDVI en diferentes tipos de cubiertas vegetales del CFLRP a partir de la serie de datos temporales del producto MOD13Q1 para el período 2010-2013".

METODOLOGIA

Área de estudio

El Complejo Fluvio/Litoral del río Paraná (CFLRP) es un humedal que posee características de sistemas ambientales complejos y heterogéneos (Figura 1). El contexto geográfico en el que se inserta la región ha presentado en las últimas décadas profundos cambios, algunos de ellos asociados a la expansión de la frontera agrícola (Kandus *et al*., 2011) y a la consecuente necesidad de desarrollo de un sistema de transporte tanto terrestre como fluvial, aumento de la urbanización e industrialización, entre otros.

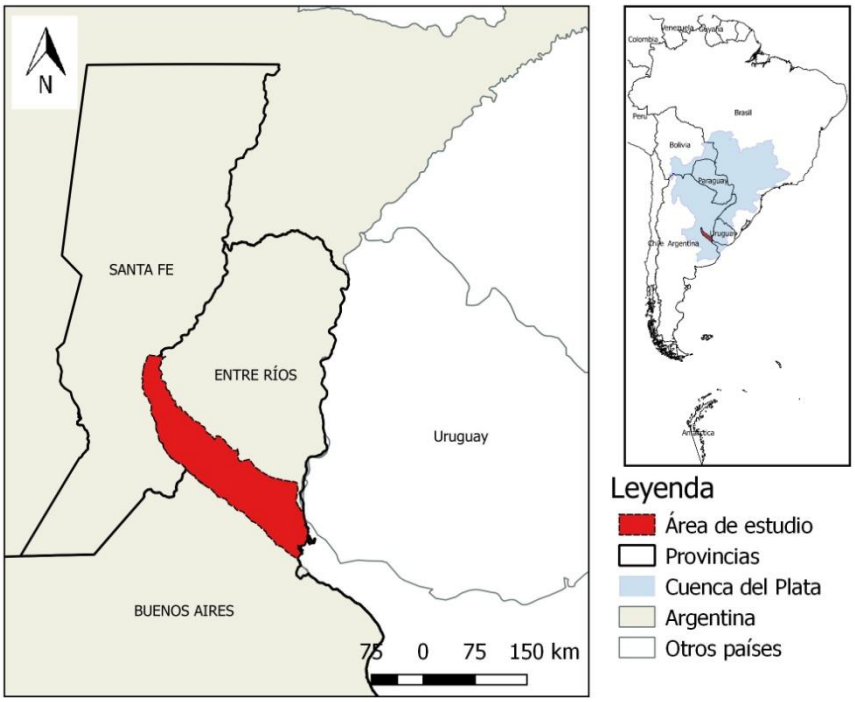


Figura 1: Ubicación del área de estudio: el Complejo Litoral del Río Paraná

Debido a lo mencionado previamente es que el CFLRP se convierte en un espacio de interés para el estudio del cambio de la actividad vegetal. La conformación y dinámica de los sistemas territoriales está estrechamente asociada a la actividad del componente vegetal. A su vez la distribución espacial y temporal de la cubierta vegetal refleja las condiciones topográficas, de uso de la tierra, y principalmente, en la región del CFLRP, las hidrológicas (Neiff, 2005). Marcheti y Aceñolaza (2012) sugirieron que en la región la composición fisionómica explica de mejor forma la distribución espacial de las comunidades vegetales que su composición florística. Se reconocen en el CFLRP las siguientes clases de cobertura:

- *Fisonomías leñosas*: a) Bosques nativos: pueden ser simples o mixtos. Los primeros son en general monoespecíficos o con una alta dominancia de pocas especies (*Salix humboldtiana* Willd. (1806) (Sauce criollo), *Tessaria integrifolia* (Aliso del Río), *Albizia inundata* Mart. Barneby & J.W. Grimes (1823) (Timbó blanco), *Sapium haematospermum* Müll. Arg. (1865) (Curupí), entre otros. Los bosques mixtos suelen ser pluriespecíficos, están representados por *Nectandra angustifolia* (Schrad.) Nees & Mart.(1833) (Laurel del río), *Erythrina cristae-galli* Krukoff (1974) (Seibo), *Inga vera* Kunth (1824) (Ingá), *Myrsine laetevirens* (Mez) Arechav. (1909) (Canelón), entre otros. b) Arbustales: Corresponde a comunidades semi-arbustivas, dominadas por *Solanum glaucophyllum* Desf., las cuales se presentan como zona de transición (varillares) entre comunidades de pajonales y vegetación lagunar. En otros casos los arbustales del CFLRP se encuentran representados por sesbaniales (*Sesbania* sp.), con las mismas especies acompañantes.

- *Fisonomías Herbáceas*: De alto porte: Pajonales/totorales/pirizales, corresponden a comunidades de herbáceas graminiformes altas, en las que domina *Panicum prionitis* Nees. En las zonas más bajas dominan los Juncales (*Schoenoplectus californicus* (C.A. Mey.) Soják), Totorales (*Thypa* spp.) y Pirizales (*Cyperus giganteus* Gribs.). Las especies acompañantes suelen ser: *Soliva anthemifolia* (Juss.) Sweet, *Solanum glaucophyllum*, *Conyza* sp.,*Gymnocoronis spilanthoides* (D. Don ex Hook. & Arn.) DC., *Eragrostis hypnoides* (Lam.) Britton, Sterns & Poggenb, *Aschynonemme* sp., *Phalaris angusta* Nees ex Trin., *Rumex* sp. *Senecio bonariensis* Hook. &

Arn., y *Cissus verticillata* Steud., entre otras. De bajo porte: a) Pastizales: praderas de herbáceas graminiformes bajas y latífoliadas, entre las que se destaca la comunidad dominada por *Polygonum* spp. Se presentan otras especies importantes como *Ludwigia* spp. y *Alternanthera* sp. B) Praderas acuáticas: libres, flotantes y arraigadas de zonas inundadas temporal o totalmente. Las especies acompañantes son: *Azolla filiculoides* Lam., *Salvinia sp., Lemna gibba* L., *Eichornia crassipes* (Mart.) Solms *y Eichornia azurea* (Sw.) Kunth, *Oplismenopsis najada* (Hack. & Arechav.) Parodi, *Enhydra sp., Panicum elephantipes Nees ex Trin.,* etc.

Esquema metodológico

La Figura 2 muestra el esquema metodológico que resume las siguientes fases: *1) Descarga:* del sitio "earth explorer" USGSNASA (http://earthexplorer.usgs.gov). Producto MOD13Q1 (Enero de 2010 a Diciembre de 2013, grillas "h12v12" y "h13v12). 2) Construcción del Mosaico: integrando las dos escenas por fecha. 3) Unión de imágenes: cada banda asignada a una fecha del período de estudio. 4) Recorte: para el área de estudio. 5) Generación de serie temporal: con frecuencia de 16 días, para 2010-2013, empleando el paquete de Idrisi TerrSet: Earth Trends Modeler. 6) Capas de coberturas de vegetación: se dispuso de un mapa de clasificación multitemporal de coberturas basado en imágenes del sensor Landsat 8 OLI (Aceñolaza *et al.*, 2014). 7) Aplicación de máscaras: con valores de cero y uno correspondiendo este último valor a polígonos con presencia de la clase de cobertura de sobre la cual se realizaron los análisis. 8) Análisis de serie temporal: Análisis de tendencia. Se estudiaron (comparación "pixel a pixel") los valores medios y rangos para la serie temporal generada y para las distintas coberturas de vegetación del CFLRP. Se estudió la Tendencia linear (r2), estacional (fase/amplitud) y la monotonicidad (consistencia).

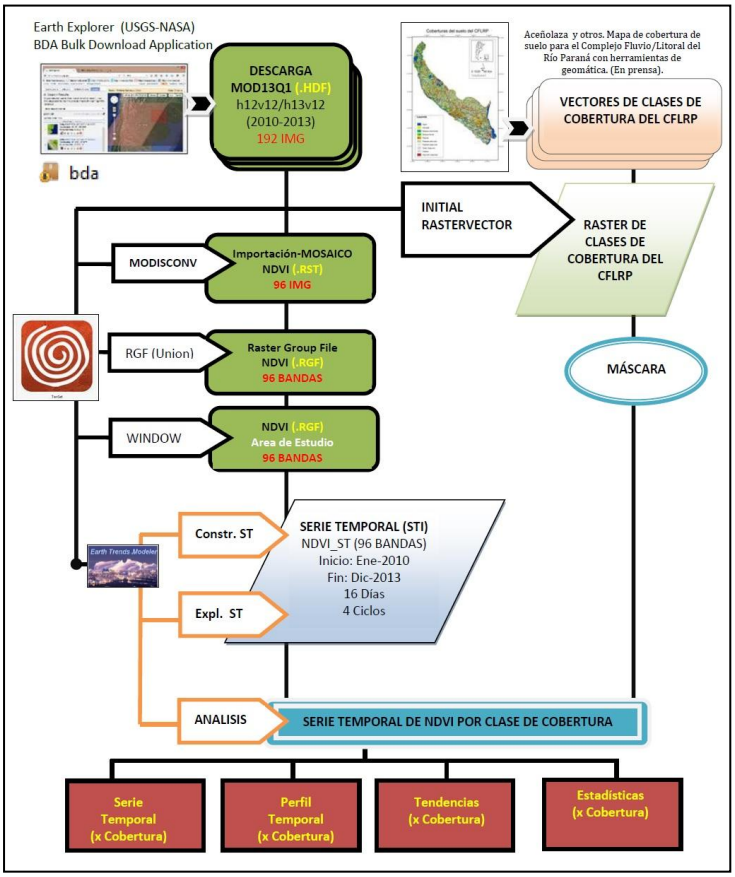


Figura 2: esquema metodológico

RESULTADOS

Serie temporal de NDVI-CFLRP 2010-2013

Se han seleccionado los meses de enero, abril, agosto y diciembre para cada uno de los años a fin de evidenciar el comportamiento del NDVI para todas las coberturas del CFLRP (Figura 3).

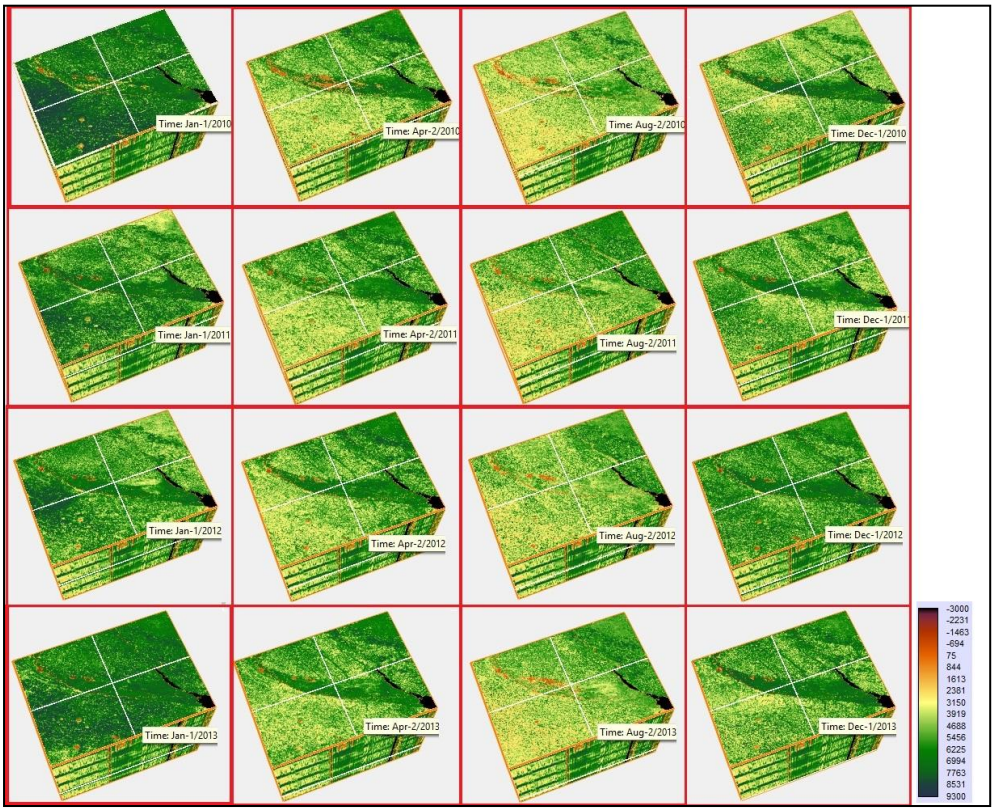


Figura 3: Visualización de la serie temporal de NDVI (cubo espacio temporal) MOD13Q1 para el CFLRP (2010-2013)

Perfil temporal de NDVI por cobertura de vegetación

La Figura 4 muestra el perfil temporal del NDVI para las diferentes coberturas estudiadas, considerando sus valores medios, el rango y el perfil realizado para una muestra de cada una de las coberturas, empleada como referencia.

Análisis de Tendencias

Se construyeron mapas de linearidad (Figura 4 y 5), tendencia estacional (Figura 6) y monotonicidad (Figura 7).

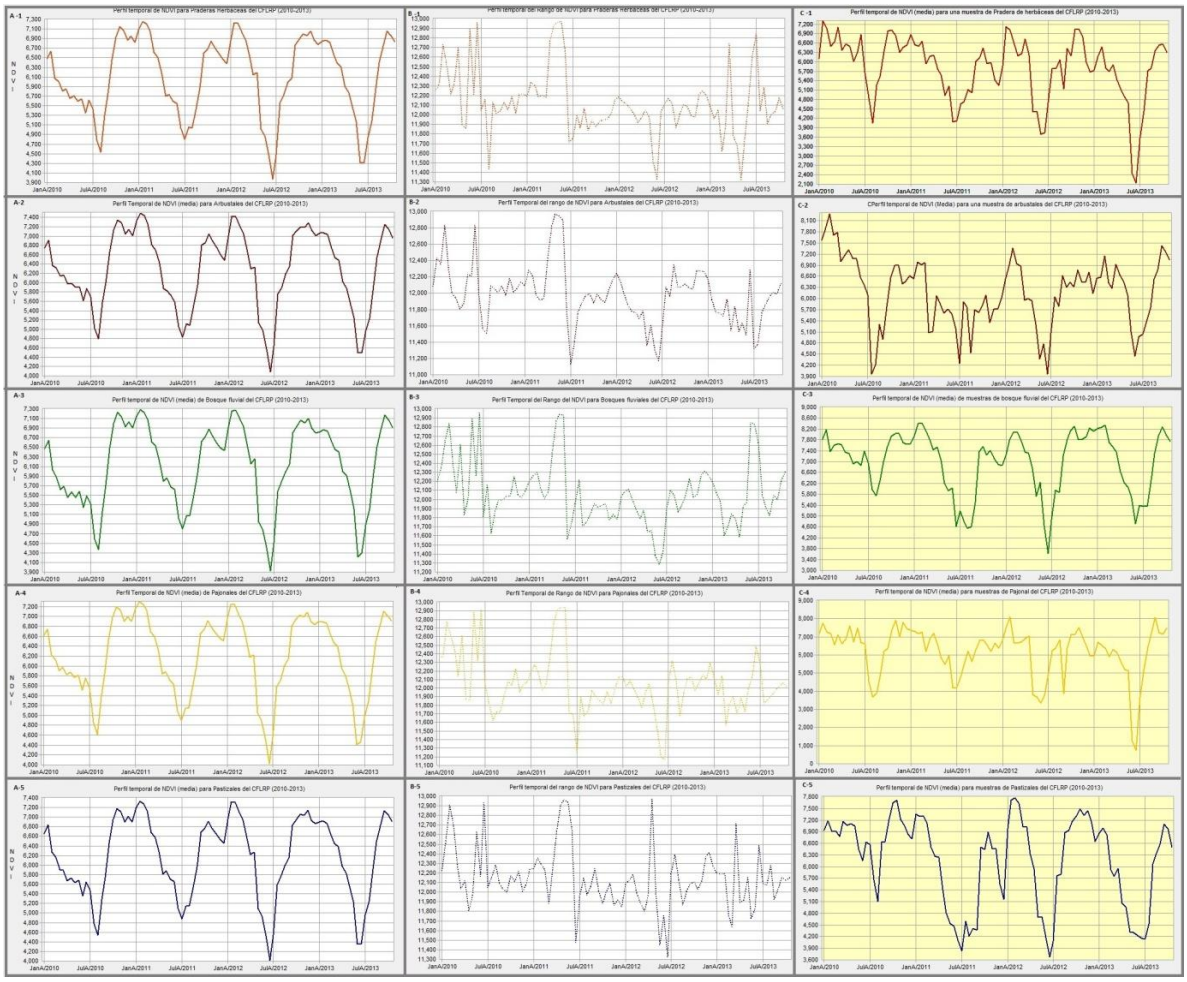


Figura 4: Perfil temporal de NDVI para coberturas vegetales del CFLRP, período 2010-2013. Valores medios (A), rangos (B) y valores medios para una muestra de cada tipo de cobertura. 1- Pradera de herbáceas; 2-Arbustal; 3-Bosque fluvial; 4-Pajonal y 5-Pastizal. En el eje X se presentan las fechas y en el Y los valores de NDVI. Los datos se presentan escalados (10.000).

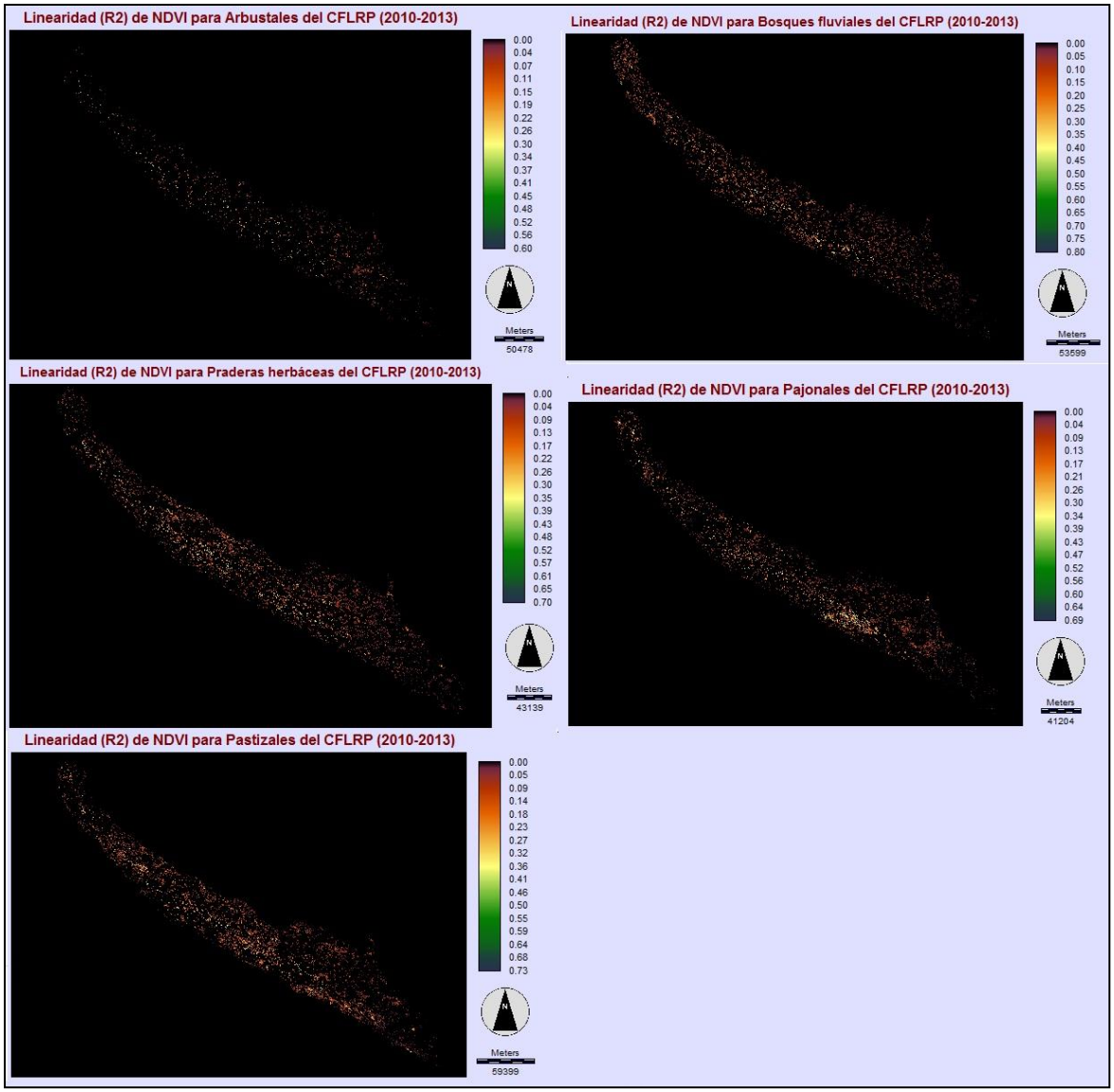


Figura 5 Linearidad (r^2) para coberturas del CFLRP

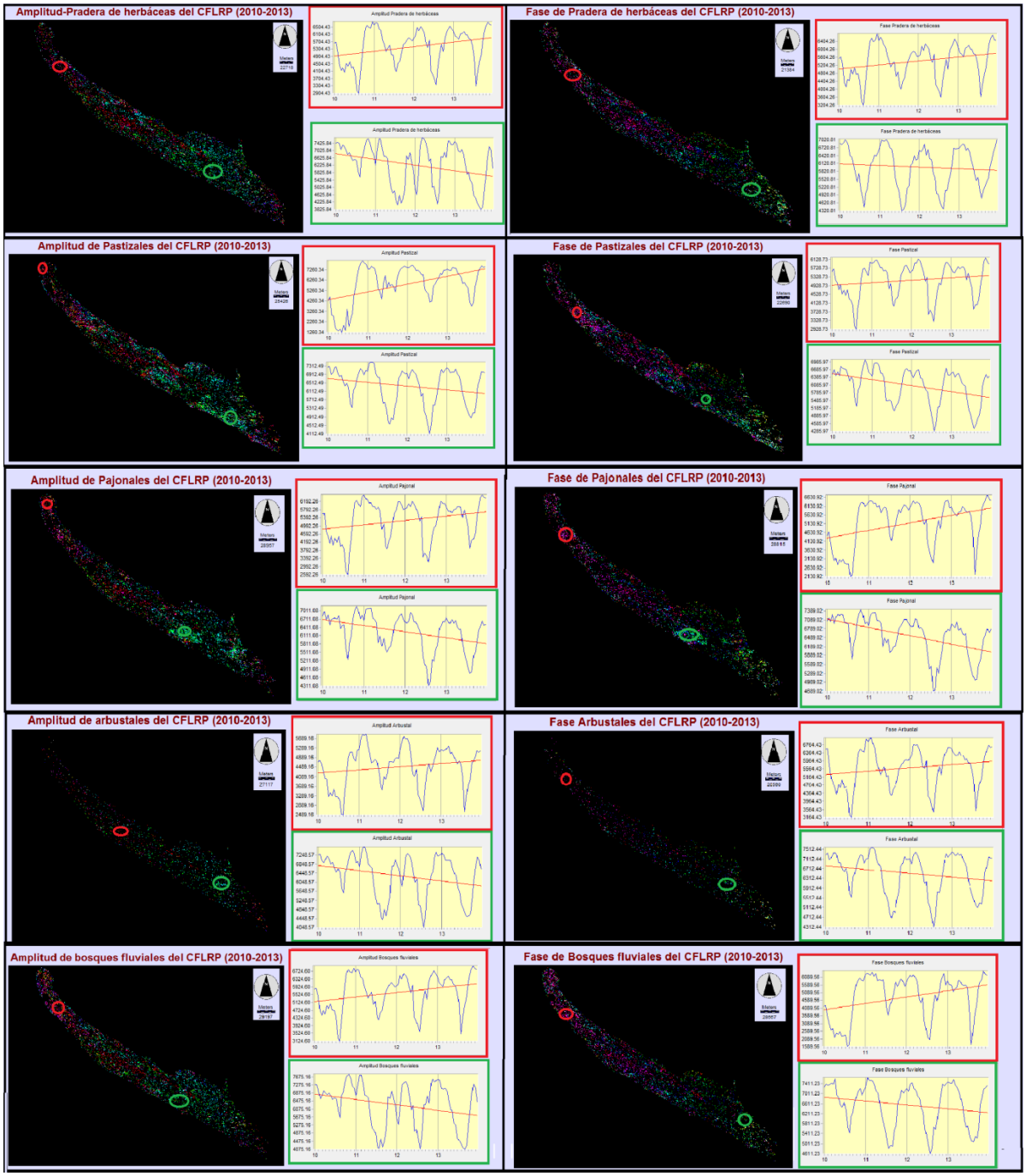


Figura 6. Fase de NDVI (media) para el CFLRP. Se observan las diferentes tendencias, representadas en el mapa y en el perfil temporal. Tonos rojos indican áreas de NDVI cuyos valores medios han aumentado en el transcurso del período estudiado. En tonos verdes-azulados se representan las áreas que presentan tendencias a la disminución del NDVI

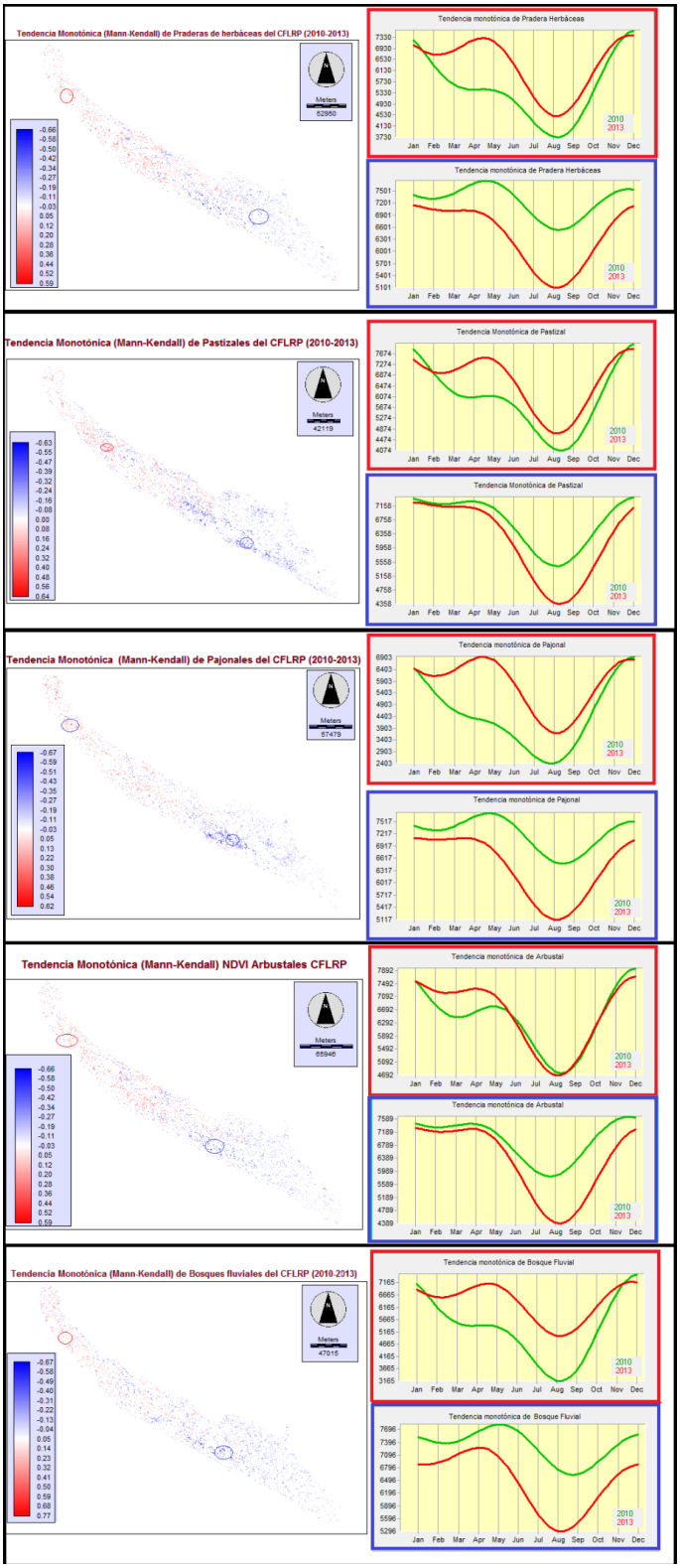


Figura 7: Tendencia de monotonicidad del NDVI para las coberturas vegetales del CFLRP (período 2010-2013). Las áreas coloreadas indican zonas de consistencia en la tendencia de las series. Se han resaltado (círculos) zonas seleccionadas para visualizar los perfiles de las tendencias (derecha) (en rojo, tendencia al aumento, en azul, tendencia a la disminución. Se presentan así los perfiles correspondientes a las áreas remarcadas. En el perfil es posible visualizar la tendencia estacional (intra anual) para el año 2010 (primero de la serie), en verde, y para el año 2013 (último año de la serie, en rojo). Perfiles con recuadro rojo/azul se refieren a las áreas del mapa resaltadas con círculo rojo/azul respectivamente.

DISCUSIÓN

El NDVI presenta una tendencia oscilatoria en su comportamiento, que puede ser en parte explicada por las características hidrológicas de la región. Resultados similares se han registrado en otros estudios (Wagner *et a*l., 2011) para áreas geográficamente cercanas (sabana uruguayense). Se diferencia el comportamiento del NDVI del CFLRP en relación al resto del espacio geográfico en el que se inserta la región, dejando de manifiesto su dinámica propia y estrechamente ligada a las condiciones hídricas.

En cuanto a las tendencias interanuales, en términos generales se observan años de mayores valores de NDVI (2013). Se observan variaciones tanto interanuales como intra-anuales. En el año 2011 la disminución correspondiente a otoño-invierno no es tan marcada como en el resto de los años. Los valores medios de NDVI presentan un patrón intra-anual con valores altos (en general superior a los 0.6, con un máximo en los meses de verano) en los meses de primavera-verano.

El análisis de NDVI por tipo de cobertura permitió conocer detalladamente las tendencias en el comportamiento del NDVI. El análisis de los perfiles muestra que para todas las coberturas estudiadas el NDVI varió entre 0.4 y 0.7, indicando valores (medios) "normales" para las coberturas de vegetación. En los meses de verano se registran los mayores valores, que se dan luego de la recuperación del verdor al finalizar el invierno. Llegado el otoño el NDVI comienza a descender hasta alcanzar sus valores mínimos en el mes de julio en todos los años y tipos de cobertura. La variación de los valores del NDVI (rango) es diferente en cada tipo de cobertura y no es similar entre los diferentes años, como sucede con los valores medios. Las muestras de NDVI muestran un perfil relativamente similar al que presentan las coberturas de vegetación, si bien se identifican de forma más detallada algunas variaciones en el índice. Las coberturas de vegetación del CFLRP presentan una tendencia linear de cambio del NDVI, con la mayoría de las áreas con un coeficiente de determinación (r2) similar a 0.3, indicando una débil correlación. En general las zonas con mayores valores de correlación son aquellas del interior (zona central) de la región para las diferentes coberturas.

Se identificaron a partir del análisis de tendencia estacional aquellas áreas donde la vegetación cambia más y menos rápidamente (mapas de fase) y donde los cambios se dan con mayor/menor magnitud (mapas de amplitud). Para todas las coberturas estudiadas seobservó que la zona norte-central del área de estudio presentó tendencia al aumento del NDVI a lo largo de la serie temporal, al tiempo que los cambios en esta región fueron rápidos y de alta magnitud. Así mismo, en la zona sur del área de estudio se observaron tendencias (veloces y de alta magnitud) hacia la disminución del NDVI. En la porción final del CFLRP no se encontró una tendencia clara en los valores de NDVI.

Los análisis de monotonicidad evidenciaron la consistencia en las tendencias del NDVI en las diferentes coberturas y zonas mencionadas previamente. Los perfiles intra-anuales de los mapas resultantes (comparación de 2010 con 2013) indicaron que para las zonas del norte del CFLRP el NDVI ha aumentado consistentemente en el transcurso del período 2010-2013 mientras que para la zona sur el comportamiento ha sido inverso.

Si bien se registran cambios en la composición específica y en los valores de biomasa de las comunidades vegetales del CFLRP en su porción norte en relación a la porción sur (delta), las fisonomías se conservan (ej pajonales dominados por *Panicum prionittis* en el norte y totorales/pirizales en el sur). Por tanto no serían estos elementos los que explicarían la diferencia de comportamiento del NDVI. Sin embargo al considerar el comportamiento de la Biomasa en los Totorales y juncales de Ibicuy, el patrón observado indica que existen diferencias entre 2011 y 2013, siendo los valores de 2011 los más elevados

Los diferentes puertos del CFLRP presentan diferencias significativas en las alturas del río, por lo que el comportamiento del NDVI podría asociarse a diferencias en la disponibilidad de agua (localmente). Sin embargo, en términos generales la altura del río está estrechamente relacionada al comportamiento estacional del NDVI. En cuanto a la relación del NDVI con los datos de biomasa para las coberturas estudiadas, se han observado diferentes dinámicas en la variación de la biomasa, disminuyendo en términos generales en los meses de fines de invierno a inicio de primavera, y mostrando variaciones entre los diferentes años. Similar patrón se observa en el NDVI intra-anual.

CONCLUSIONES

El uso y la integración de diferentes productos (MOD13Q1, vectoriales de cobertura resultantes de clasificación de imágenes del sensor Landsat 8 OLI), derivados de la teledetección (Multiescala) permitieron conocer y estimar el comportamiento de la vegetación del CFLRP.

- La alta resolución temporal del Producto MOD13Q1 resultó adecuada para evidenciar los cambios en la dinámica del NDVI para la región.
- El comportamiento del NDVI muestra tendencias relativamente similares en las diferentes coberturas de vegetación del CFLRP (en sus valores medios).
- La dinámica hidrológica de la región muestra un patrón similar al del NDVI, lo que sugiere que el comportamiento de la vegetación respondería a las variaciones en la altura del río.
- La variabilidad en el NDVI no es constante a lo largo del período estudiado ni es similar en los diferentes tipos de cobertura.
- La zona norte del CFLRP presenta tendencias consistentes de aumento de NDVI para todas las coberturas estudiadas, mientras que la zona sur presenta una tendencia inversa.
- Diferentes variables como la altura del río, la biomasa y la ocurrencia de incendios (VER) están asociadas estrechamente a la dinámica del NDVI en la región.
- El uso de series de datos de NDVI para diferentes coberturas del CFLRP puede ser empleado para modelar las tendencias del comportamiento de la vegetación en la región.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Roberto De Bonis, Dra. Maria Marsella, y Dr. Giovanni Lanneve (Univ. de la Sapienza, Roma) por su desinteresada colaboración y aportes metodológicos en la elaboración del este capítulo. A Raúl d Ángelo y Estela Rodriguez. A la Universidad Autónoma de Entre Ríos y al CICyTTP-CONICET Diamante por el apoyo y recursos brindados.

BIBLIOGRAFIA

Aceñolaza P. G., L. P. Zamboni, F. Kalesnik, E. E. Rodriguez, W. F. Sione y C. Serafini. (2014). Mapa de cobertura de suelo para un sector del norte del Complejo Fluvio/Litoral del Río Paraná con herramientas de geomática. Actas XVI Simposio Internacional de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota (SELPER). Colombia. 1-10 pp.

Brown, D., Polsky, P., Bolstad, S., Brody, D., Hulse, R., Kroh,… & Thomson, A. (2014). Ch. 13: Land Use and Land Cover Change. En: J. Melillo., T. Richmond. & G. Yohe, (Eds.). Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment. (pp.318-332) U.S. Global Change Research Program. DOI:10.7930/J05Q4T1Q.

Kandus P., P. Minotti y M. Borro. Contribuciones al conocimiento de los humedales del Delta del Río Paraná: herramientas para la evaluación de la sustentabilidad ambiental. 2011. Kandus P.; P. Minotti, M. Borro (Ed.). Universidad Nacional de Gral. San Martín. 1º Ed. 32 pp.

Marcheti Z. y., P. G. Aceñolaza. 2012. Pulse regime and vegetation communities in fluvial systems: The case of the Parana River floodplain, Argentina. Flora 207: 795– 804.

Neiff, J.J. Bosques Fluviales de la Cuenca del Paraná. 2005. Arturi M.F, J.L. Frangi y J.F. Goya (Edit). La Plata. Argentina. 26 pp.

Salvia, M. 2010. Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del macrosistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires. 197 pp.

Sione W., P. Aceñolaza, L.P. Zamboni, H.F. del Valle, M.C. Serafini y J.F. Gallardo La Aplicación de la teledetección en la estimación de las emisiones extraodinarias de CO2 por quemas de áreas insulares en el complejo litoral de Río Paraná (R. Argentina). En:
Emisiones de gases con efecto invernadero en ecosistemas Iberoamericanos. Juan F. Gallardo Lancho (Coord.). Red Iberoamericana de Física y Quimica Ambiental. Salamanca. España. (2009).255-272 pp.

Sione, W., P. Aceñolaza, L. P. Zamboni, C. Serafini, H.F. del Valle y J. F. Gallardo Lancho. (2008.) Estimación indirecta de emisiones de CO2 a partir de información satelital en áreas quemadas de ambientes insulares del delta del río Paraná (Argentina).Revista Selper. VOL. 29-Nº 2. ISSN 0717-2915. 1-10 pp.

Solano R., K. Didan, A. Jacobson y A. Huete.(2010). MODIS Vegetation Index User´s Guide (MOD13 Series). Version 2.0. Collection 5. 42 pp.

Tucker, C.J., Sellers, P.J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. International Journal of Remote Sensing. 7:1395-1416 pp.

Wagner, A.P.L; E. Weber; H. Hasenack; E. V. Klering y D. C. Fontana. 2011. Variabilidade Temporal do NDVI/MODIS na Análise de Remanescentes da Ecorregião das Savanas Uruguaias. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE.5600 pp.

Zamboni L., Sione, W., Tentor, F. & Aceñolaza, P. (2014). Cartografía de cambios de cobertura del suelo (1987-1998) para el Parque Nacional Predelta (Entre Ríos, Argentina). Revista Geográfica de América Central, 52, 158-180.

APLICACIÓN DE TELEDETECCIÓN PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE GLACIARES

María de los Ángeles Tesoniero[1-2], Matías Caso[1-2]

[1]Departamento de Geografía, Universidad Nacional del Comahue. Arg. matesoni@yahoo.com.ar
[2] Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas de los Río Limay Neuquén y Negro.
mtesoniero@aic.gob.ar; mcaso@aic.gob.ar

RESUMEN

Dada su posición geográfica, la provincia de Neuquén presenta tres volcanes en los que aún perduran masas glaciarias de considerables superficie, las cuales son estudiadas a partir del uso de la Teledetección, como herramienta de análisis multitemporal y multiespectral. El presente trabajo es la continuación de estudios realizado en años anteriores y donde se pudo analizar un registro de imágenes de 20 años, entre 1991 y 2010, lo que permitió observar las fluctuaciones de los cuerpos de hielo del volcán Domuyo (4702 m.s.n.m), a partir de la interpretación visual y digital de imágenes satelitales Landsat TM y ETM de 30 metros. En esta instancia el objetivo fue ampliar el período de estudio, como así también agregar escenas intermedias a las ya analizadas A dichas imágenes, se les realizo las correcciones geométricas y radiométricas pertinentes, como así también se consideró, para la selección de las escenas, el período de ablación para el Hemisferio Sur (febrero), con fines de evitar la inclusión de nieve estacional como parte del área permanentemente englazada, que sobreestime la superficie de un determinado glaciar. Previo estos recaudo, se mapearon y compararon las superficies cubiertas de hielo, y se realizó una estimación del derrame producido por las masas de hielo glaciar en épocas de verano. En este último caso se utilizó la herramienta de modelación matemática HBV/IHMS (modelo de balance hídrico, determinístico, conceptual, continuo y distribuido; que describe los principales procesos de ciclo hidrológico), la cual contiene una rutina de nieve/glaciar que controla la acumulación y fusión. Además se analizaron los ciclos hidrológicos, teniendo en cuenta datos puntuales de equivalente agua nieve (EAN) y cobertura de área nevada obtenida con imágenes MODIS 09, para cada año de estudio. Los resultados de la investigación realizada, evidencia distintos comportamientos en relación a la pérdida de superficie/volumen de hielo según sus orientaciones, siendo los de orientación este y sureste los que manifiestan la mayor pérdida de masa de hielo.

Palabras Clave: Teledetección, Imágenes Satelitales, Volcán Domuyo.

ABSTRACT

Given its geographic location, the province of Neuquén has three volcanoes in which glacial masses still exist with a considerable surface. This are studied through the use of remote sensing as a tool for multi-temporal and multi-spectral analysis. This work continues a series of studies conducted in the past which consisted in the analysis of 20 years image recordings (between 1991 and 2010), that allowed to observe the fluctuations of the ice mass in Domuyo volcano (4702 m), using visual and digital interpretation of 30 metres satellite images Landsat TM and ETM. In this instance the aim was to extend the period of study, as well as add-intermediate scenes to those already analyzed. This image underwent geometric and radiometric corrections whenever considered relevant. Te ablation period in the Southern Hemisphere (February) was considered for the selection of the scenes, as a way of avoiding the inclusion of seasonal snow as part of the permanently glaciated area, which would lead to the overestimate of the surface of a particular glacier. Prior these precautions, we mapped and compared icy surfaces and estimated the spill produced by the masses of glacial ice during summertime. For that, a mathematical modeling tool was used (HBV/IHMS: a deterministic, conceptual, continuous and distributed water balance model that describes the main processes of the hydrological cycle), which contained a snow/glacier routine that estimates accumulation and fusion. Hydrological cycles were also analyzed, taking into account specific data for snow water equivalent (EAN) and snow coverage area, which was obtained using MODIS 09 images for each year of study. The results of this investigation, shows the different behaviors in relation to the loss of surface and volume of ice according to its

guidelines. The east and southeast orientation shows the greatest loss of ice.

Keywords: Remote sensing, satellite images, Domuyo Volcano

INTRODUCCIÓN

El clima fluctúa de manera constante a lo largo de la historia del planeta, en la actualidad, la comunidad científica sostiene que se está atravesando por un período relativamente cálido, denominado Calentamiento Global, entendido como un aumento del promedio mundial de temperatura del aire y del océano y el consecuente aumento del nivel del mar, a causa de la actividad humana.(CMCC, 1992) Si bien han existido períodos en los que la temperatura media fue muy superior a la actual, también hubo periodos con temperaturas medias por debajo de las actuales. "Durante el siglo XX, la mayoría de los glaciares se han retirado, pero algunos glaciares han tenido una dinámica particular, produciéndose excepciones(…) por ejemplo, los avances sostenidos del Glaciar Perito Moreno (…)la importancia relativa de las condiciones climáticas, topográficas y la dinámica propia del glaciar en los patrones regionales de las fluctuaciones glaciares siguen siendo un enigma…." (Warren y Aniya, 1999)

En la provincia de Neuquén hay numerosos cuerpos de hielo, que han sido escasamente estudiados, tal como lo comenta Rabassa y otros, 2011; en su mayoría correspondes a los denominados, manto de hielo de montaña de los Andes, asociado a la cadena montañosa homónima, por ejemplo el Volcán Lanín y el Copahue; otros son englazamientos locales en forma de glaciares de descarga como el estudiado en este caso, Volcán Domuyo.

En el presente estudio, el objetivo fue continuar con los trabajos desarrollados en años anteriores, para el Volcán Domuyo. El mismo se localiza al norte de la provincia del Neuquén, con una altura de 4702 m.s.n.m y se constituye en la mayor altura de la Cordillera del Viento, cadena montañosa con disposición norte-sur, paralela a la Cordillera de los Andes. En esta instancia el estudio multitemporal de las fluctuaciones glaciarias se consideró a partir del año 1986 y se extendió hasta el 2011, pasando por escenas del 1991-2001-2004 y 2010; La confección de los límites de las áreas glaciarias presentadas en este trabajo, fue a partir de imágenes Landsat 5 TM, corregidas geométrica y radiométricamente. De esta manera se pudo ampliar el período de estudio realizados en años anteriores, de 20 años de estudio a 25 años el período de análisis.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente informe se utilizaron las siguientes imágenes para el estudio multitemporal y multiespectral (Tabla 1):

Tabla 1: Imágenes utilizadas

SENSOR	AÑO	RESOLUCIÓN
LandSat 5 TM 232_085	06-02-1986	30 metros
LandSat 5 TM 232_085	04-02-1991	30 metros
LandSat 5 TM 232_085	27-03-2004	30 metros
LandSat 5 TM 232_085	13-04-2010	30 metros
LandSat 5 TM 232_085	27-02-2011	30 metros

Fuente: imágenes extraídas de la web usgs.gov

La determinación multitemporal de las fluctuaciones glaciarias, a través de la teledetección, como técnica apropiada, nos permitió obtener información a distancia de los objetos situados en la superficie terrestre (Chuvieco, 2010) Esta ha sido una herramienta fundamental dado que la utilización de imágenes satelitales permitió obtener información de lugares inaccesibles. Así también los rasgos geomorfológicos de erosión y depositación glaciar, permitieron inferir la magnitud de las glaciaciones y estimar avances o retrocesos en el período en estudio.

A continuación se expone la metodología empleada para el procesamiento de las

imágenes y para la obtención final de las superficies cubiertas de hielo glaciar. La misma esta basa en una serie de criterios individuales, que resultan importantes y fundamentales para seleccionar correctamente y discriminar con mayor precisión los glaciares; esto tiene que ver con la fecha de toma de la imagen, cobertura de nieve estacional o temporal y cobertura nubosa de la imagen entre otros. Cabe aclarar que varios de estos criterios son los utilizados para el inventario nacional de glaciares y fueron tenidos en cuenta para poder realizar comparaciones futuras.

En primer instancia se seleccionaron la imágenes del sensor Landsat, dado que el hielo glaciar presenta una respuesta espectral muy elevada en las longitudes de onda del espectro visible (entre 0.4 y 0.7 µm), que disminuye conforme aumenta la longitud de onda, siendo muy baja en torno a 1.5 µm. En este sentido ell uso de los sensores como Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ son ideales por disponer de bandas que se encuentran en estos rangos del espectro electromagnético. Dicha selección se realizó

para los meses de febrero, marzo y abril, dado que son los meses ideales para discriminar los glaciares, ya que se considera el final del período de ablación y permite mostrar el mayor potencial con fines del mapeo de glaciares. Evitando la inclusión de nieve estacional como parte del área permanentemente englazada, que

Siguiendo a el autor, éste desarrolla la fórmula donde los valores de estos parámetros para Landsat 5, junto a los valores de irradiancia solar en el techo de la atmósfera (E0k) y de transmitancia (k) para cada una de las bandas. El término **k** se refiere a cada una de las bandas del sensor y **Lsen;k** es la radiación que recibió el sensor.

En última instancia se analizaron y verificar los datos de las precipitaciones níveas, temperaturas y lluvias del año hidrológico anterior a la toma de la imágenes, para corroborar la información obtenida en los distintos años, este es un recaudo que también se sugiere tomar desde el Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial-IANIGLA-CONICET 2012, para no generar sobre u subestimación de las masas glaciarias.

Se realizó una estimación del derrame producido por las masas de hielo glaciar en épocas de verano, utilizándose la herramienta de modelación matemática, Modelo de balance hídrico, determinístico, conceptual, continuo y distribuido (HBV/IHMS); que describe los principales procesos de ciclo hidrológico. La misma contiene una rutina de nieve/glaciar que controla la acumulación y fusión. Además se analizaron los ciclos hidrológicos, teniendo en cuenta datos puntuales de equivalente agua nieve (EAN) y cobertura de área nevada obtenida con imágenes MODIS 09, para cada año de estudio.

sobreestime la superficie de un determinado glaciar.

En segunda instancia las imágenes seleccionadas fueron corregidas geométricamente, con el objetivo de remover las distorsiones. La misma consiste en ubicar cada píxel en su posición planimétrica correspondiente, permitiendo que la información obtenida desde los sensores remotos, se pueda relacionar con información temática de otras fuentes en SIG y de esta manera obtener distancia y/o áreas, fundamental en este trabajo.

Posteriormente se procedió a aplicar una corrección radiométrica, la cual consiste en transformación de los Niveles Digitales (ND) que son medidas radiométricas relativas. Para realizar un trabajo multitemporal es necesario esta transformación de los parámetros físicos de la imagen; ésto es un trabajo complejo porque intervienen varios factores que alteran la señal detectada por el sensor. Esta no depende solamente de la cubierta terrestre; sino también de otros elementos ajenos: atmósfera, condiciones de observación, tipo de sustrato, fecha de adquisición, etc.

La corrección radiométrica, mediante el pasaje de los Números Digitales a Radiancia se realizó con el sofware ENVI 4.8, mediante la utilización los coeficientes de corrección radiométricas propuestos por CHANDER (2009).

$$L_{sen,k} = a_{0,k} + a_{1,k} * ND_k$$

RESULTADOS

En el presente trabajo se expresan los datos de la modelación para los años 2001-2010-2011, en los meses de enero, febrero y marzo. En este periodo, el aporte al escurrimiento superficial, depende exclusivamente de deshielo aportado por la masa glaciar. Como se observa en el gráfico Nº1 existe una fluctuación diaria, donde el máximo de los picos se produce a las 6 hs. Esto es producto de la distancia que separa al glaciar de la estación de medición de caudales, más próxima al área de estudio (Andacollo) la cual se encuentra a 86 km. Se estimó que el tiempo de retardo es de 9-12 hs, siendo la

máxima fusión diaria de la masa de hielo, entre las 13 y 15 hs donde la radiación solar es la de mayor intensidad.

Las siguientes Figuras N° 1-2-3 expresan los resultados que arrojó la modelación matemática para los meses de enero, febrero marzo para los años 2001-2010 y 2011.

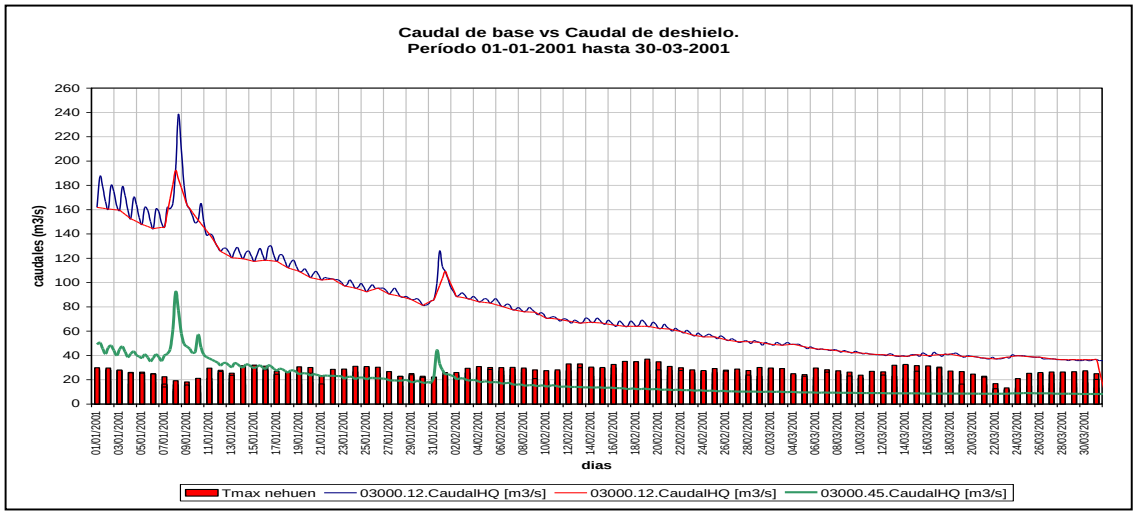


Figura 1

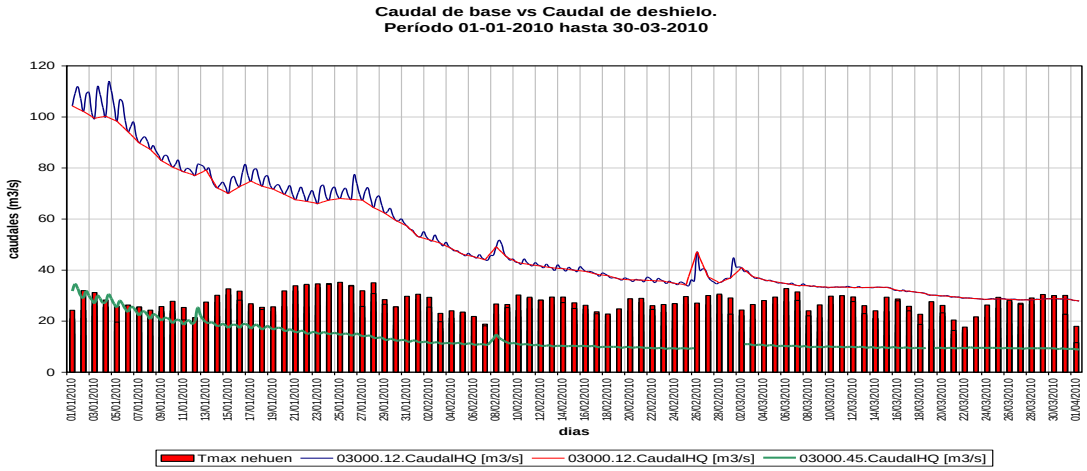


Figura N° 2

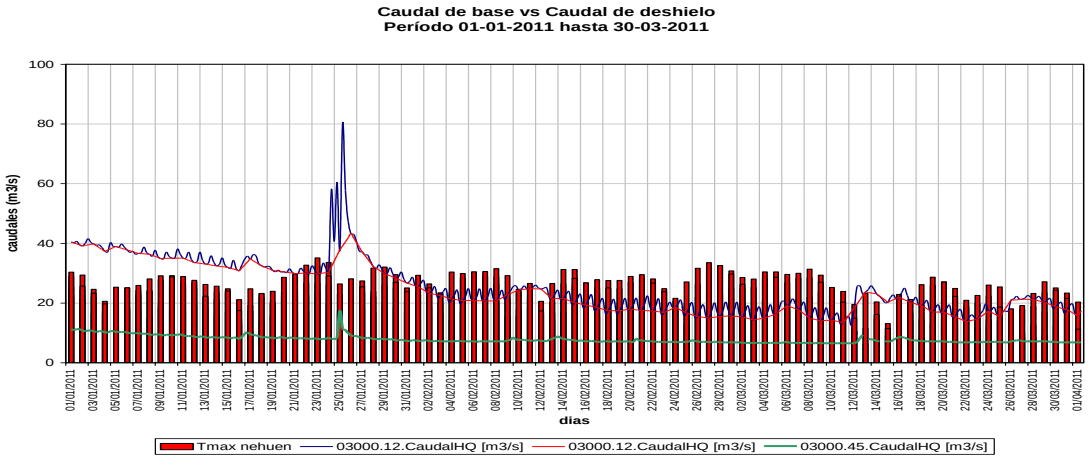


Figura N° 3

Los resultados de la modelación matemática para los años analizados, indican que el porcentaje aportado por el deshielo glaciar al derrame, ronda entre 1,9 y 5,1 %. Este aporte está estrechamente relacionado con la acumulación de nieve en los meses anteriores. El aporte de la nieve para el año 2011 fue mayor que el 2010, en la mayoría de las subcuencas que drenan desde el Domuyo, esto no solo se observa en la cobertura de área englazada que fue digitalizada, sino también en aporte del derrame en época de verano; siendo del 1,9 % para el año 2010 y 5,1% para el año 2011 y en la cobertura de área nevada obtenida con imágenes MODIS 09. (Figura N° 4)

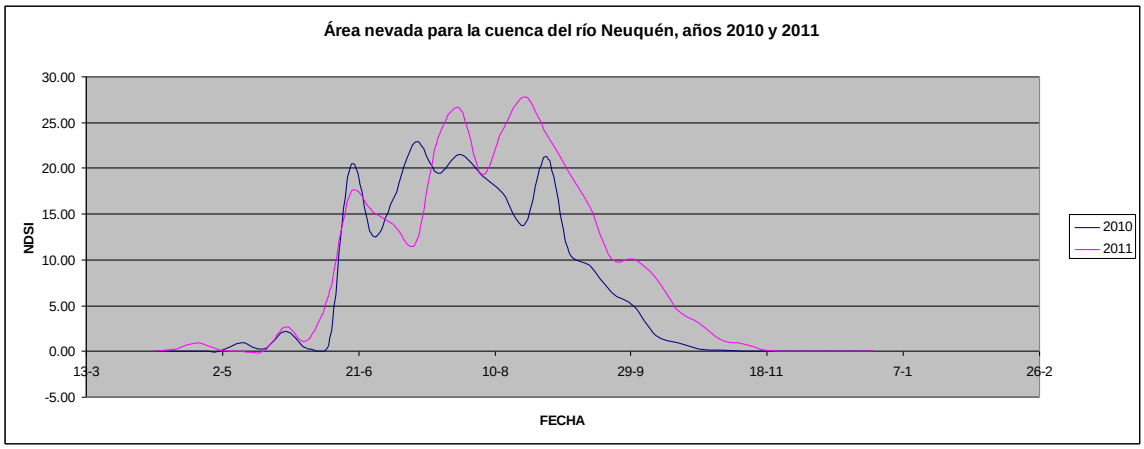


Figura 4

Finalizados los análisis hidrológico se procede a la interpretación visual de cada una de las imágenes, se realiza la delimitación y mapeo de las cuencas que drenan desde el Volcán Domuyo. Así también se analizaron las geoformas asociadas a la erosión y depositación, que surgen de la acción de los glaciares, lo que permitió inferir, la acción de los mismos en épocas anteriores y ajustar la demarcación de las áreas.

Así también el IANIGLA (2012) en su Manual, describe una tipología de glaciares donde se nombra las formaciones más comunes de glaciares visibles en las imágenes satelitales, pero también de habla de los glaciar de escombros. Estos últimos son una mesoforma criogénica de permafrost de montaña, sobresaturada en hielo que, si es activa, se mueve pendiente abajo por gravedad y por reptación y deformación del permafrost. Para el caso, que se muestra en la Fig.N°5, subcuenca del Arroyo Domuyo Sur, no se visualiza la presencia de glaciares, sólo pequeños manchónes de nieve, en las fechas de imágenes satelitales analizadas y en ésta toma del Google Earth. Tal como los demuestran los resultados definitivos, esta subcuenca es la que presenta menor cobertura de hielo para los años estudiados. Sin embargo, el arroyo que nace de ésta, es uno de los de mayor aporte al derrame de fluviales, por lo que es probable que se encuentren glaciares cubiertos de escombro. Cabe aclarar que esto es sólo una interpretación ya que no se han realizado salidas al terreno para relevarlo. Solo se verifica por su forma, textura y se asocia a la geología representada en el área como depósitos y sedimentos glaciares (Llambía, 1978)

Figura .N° 5 Vista General del Volcán, con los límites de la subcuencas.-

Finalmente se realiza la Interpretación Digital a través de la combinación de bandas que permite la discriminación de hielo glaciar. La misma fue 752 del sensor Landsat 5, donde la banda 7 del infrarojo lejano; la banda 5 del Infrarojo cercano y la banda 2 del visible permiten la discriminación.

La aplicación de la teledetección permitió acceder a una visión global de una región muy extensa (133.850 hectáreas) y obtener resultados comparables para un lapso de 25 años de análisis. La siguiente tabla presentan las hectáreas digitalizadas y comparadas por años de la misma escena del sensor Landsat 5.

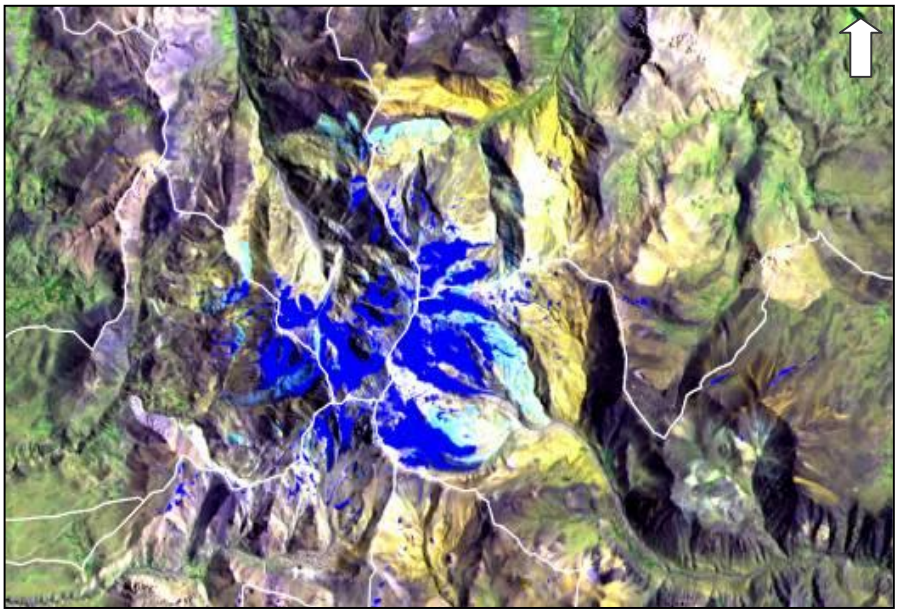


Fig N° 6: Cumbre Volcán Domuyo: combinación Falso Color- Bandas 752 Landsat 5. En tonos de azul intenso se discrimina el hielo glaciar y en tonos de celeste claro la nieve.

Tabla N° 7 Datos de áreas cubiertas con glaciares por subcuenca del Vn.Domuyo para los años 1991-200-2010 en Ha

SUBCUENCAS AÑOS	1986	1991	2004	2010	2011
A°Blanco	325,01	286,07	280,96	323,40	388,36
A°Chadileo	1072,26	985,23	965,34	1084,91	1022,31
A°Turbio	512,73	527,68	465,18	468,92	407,08
A°Manchana Covunco	157,34	217,05	144,46	139,32	177,85
A° Covunvo	91,24	125,06	102,07	75,50	109,65
A° Domuyo Sur	0,00	65,86	77,86	71,66	0,00
TOTALES	2158.90	2206,95	2035,87	2163,71	2168,25

Fuente: Elaboración Propia en base al procesamiento de los datos, de las digitalización desde al imágenes satelitales.

La Tabla 7 se realizó en base a la información obtenida de la digitalización en pantalla de las áreas con glaciares de las imágenes satelitales Landsat analizadas para los 5 años estudiados. El objetivo es mostrar gráficamente la escasa variabilidad de las superficies con glaciares, del Volcán Domuyo.

CONCLUSIÓN

La teledetección ofrece ventajas al poder obtener información multitemporal y multiespectral, permitiendo obtener una enorme riqueza de información de un mismo objeto, al ser interpretado su comportamiento en distintas longitudes de onda del espectro electromagnética; como así también poder interpretar lugares de difícil o nulo acceso.

La masa glaciar del volcán Domuyo es vital importancia para las comunidades que se emplazan aguas abajo del mismo, ya que este actúa como reservorio de agua para los meses de déficit hídrico. Los resultados que otorgo la modelación matemática indican que el aporte del glaciar ronda entre 1,9 y 5,1 % del volumen total para los meses de enero, febrero y marzo.

Para este estudio en particular, se puede concluir que si se considera la exposición de las laderas del volcán y las pendientes; los glaciares que tiene mayor superficie son los que se ubica en las laderas este y noreste (Blanco, Chadileo, Turbio), donde recibe menor insolación, dado que se encuentra en el sector de umbría y no está afectado por la acción directa de los vientos predominante del sector oeste y suroeste. En contraposición, las cuencas de los arroyos Manchana Covunco, Covunco y Domuyo Sur son las que tienen menor presencia de áreas cubiertas de glaciares y las que han sido afectadas mayormente en la reducción de su superficie, siendo el caso extremo la cuenca del arroyo Domuyo sur, que para los años 1986 y 2011 no se registró áreas con glaciares en las imágenes seleccionadas. En general para los 25 años de estudio las fluctuaciones que se han detectado, mediante esta metodología, no evidencia modificaciones de relevancia.

BIBLIOGRAFÍA

Alva Huayaney, M.E. y Meléndez de la Cruz, J.F., 2008 Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glacial en la Cordillera Blanca. Lima Perú, Investigación Social Vol.13 Nº22.

Consejo Federal de Inversiones (CFI) 2004 Informe Final Plan de manejo Área Natural protegida Sistema Domuyo. Neuquén.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), 1992.

Chander, G.,Markham, B.L., Helder, D.L. 2009. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. (In Press, Remote Sensing of Environment, Manuscript Number: RSE-D-08-00684)

Chuvieco Salinero, E. 2010 Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio. Barcelona: Editorial Planeta, 1ra. Edición.

Gonzales Díaz, E. y Folguera, A. 2011 Análisis geomorfológico del tramo medio e inferior de la cuenca de drenaje del río Curri Leuvú, Neuquén. Rev. Asoc. Geol. Argent. [online]. vol.68, n.1 Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004

Inventario Nacional de Glaciares. IANIGLA CONICET. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Nación. Informe Preliminar. Subcuenca del río Agrio, Cuenca del río Neuquén Provincia del Neuquén.2014

IANIGLIA –CONICET 2012 Manual para la realización del Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial http://www.glaciares.org.ar

Kokot, R.R. Erosión en la costa patagónica por cambio climático. Revista Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, vol.59,N°2004 Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-

Llambía ,J.E; Dandrfer, J.C;otros, 1978 Las Rocas Ígneas cenozoicas del volcán Domuyo y áreas adyacentes. VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén Actas II: 569-584 BsAs

Llambía,J.E, 1985 Intrusivos Permicos del Sur de la Cordillera del Viento. Revista Asociación geológica Argentina. Rev.XII (1-2)22.32

Lambía, E, 1978 Geología del Domuyo en Plan de Manejo Área Natural protegida Sistema Domuyo.

Ostertag, G y Cuello,M 2005. Característica climáticas de la Alta Cuenca del Río Neuquén, andes patagónicos. Boletín Geográfico N° 26. Departamento de Geografía. FAHU Universidad Nacional del Comahue.

Palacios, M; Lambía,J.E; 1978 Las Fuentes Termales del Volcán Domuyo, Provincia del Neuquén. VII Congreso Geológico Argentino, Neuquén Actas II: 145-159

Rabassa, J., 1999. Cuaternario de la Cordillera Patagónica y Tierra del Fuego. En: R. Caminos (Ed.), Geología Argentina,

Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires, Anales 29 (23), 710-714.
Rabassa, J.; Clapperton, C.M. 1990. Quaternary glaciations in the southern Andes. Quaternary Science Reviews 9: 153-174.
Rabassa. J, Coronato.A, Ponce.J.F, Schelieder.G, Martinez.O. 2011. Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino. p. 295-322 Neuquén
Rabassa, J. 2007. El Impacto del cambio climático en los glaciares patagónicos y fueguinos. Ciencia Hoy, 17, 97, Febrero-Marzo 2007. http://www.cienciahoy.org.ar/ch/ln/hoy97/index.htm
Straher, Arthur, 1989 Geografía Física. Ediciones Omega. Barcelona España
Tarazona Coronel, Y. 2012 Aplicación de la teledetección como una herramienta para el análisis multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Pastoruri debido al Cambio Climático. Lima Perú. Tesis. Universidad Nacional de San Marcos. Disponible en https://teledeteccionsigcartografia.files.wordpress.com/2013/01/retroceso-del-nevado-pastoruri.pdf.
Warren,Charles Aniya, Masamu 1999 The calving glaciers of southern South America Global and Planetary Change 22 1999 59–77- Global and Planetary Change 22 1999 59–77 www.elsevier.com

AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Fernando Frasseto
Ing Diego Uyoa

LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA Y LA EVALUACION MULTICRITERIO COMO METODOLOGIA PARA LA LOCACION ÓPTIMA DE CAMPOS DE GENERADORES DE ENERGIA EOLICA.CASO DE ESTUDIO: PROVINCIA DE SAN JUAN

Márquez, Eduardo Jaime (1), Del Cid, María Concepción (2), Velazquez, Laura (2), Martinez, Mirtha (2), López, Juan Manuel (3)

(1) Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro (CEFOCCA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan-Argentina
(2) EPSE- Provincial Sociedad del Estado_ Gobierno de San Juan_ Argentina

RESUMEN

Nuestra sociedad de hoy, se desenvuelve cotidianamente dentro de un ambiente tecnológico con una intensión de uso de estas tecnologías cada vez más acentuada, lo que la hace gran demandante de energía. Esta energía es provista en su gran mayoría todavía por residuos fósiles, lo que hace que la explotación y el uso de la misma sea altamente contaminante y también perecedera a no muy largo plazo. También hay otras fuentes alternativas de energía como la atómica que trae aparejado riesgos de contaminación en su manipulación. Frente a este panorama las sociedades están intentando cambiar la matriz energética incluyendo en la misma fuentes de energía renovables no contaminante, como las energías fotovoltaica, **eólica**, hidráulica, biomasa. El objetivo a alcanzar, es definir el mejor emplazamiento geográfico de los campos eólicos con el fin de producir energía eléctrica. Este trabajo propone usar el tándem de las técnicas **Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Evaluación Multicriterio** como un procedimiento adecuado para generar modelos decisionales y apoyar la tarea en la toma de decisión en la ubicación de las mejores zonas de instalación de futuros parques eólicos óptimas a nivel espacio geográfico de la provincia de San Juan. Argentina. Los *Sistemas de Información Geográfico* (SIG) funcionan como herramientas especialmente desarrolladas para montar y administrar modelos de simulación y manejar criterios y restricciones físicas, económicas y medioambientales parar luego tomar la mejor decisión. La *Evaluación Multicriterio* (EMC), tiene como fin básico investigar un tema bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto (Voogd, 1983). En este sentido, los métodos de EMC incorporados en los SIG permiten transformar y combinar conjuntamente datos geográficos y juicios de valor (preferencias e incertidumbres de los expertos) con el objetivo de obtener una información adecuada y útil para la toma de decisiones (Boroushaki y Malczewski, 2010)

INTRODUCCIÓN

La energía eólica**,** como fuente alternativa de energía renovable**,** procede de la radiación solar por la producción de masas de aire con diferentes temperaturas y presiones. La distribución espacial de la energía eólica está rígidamente condicionada por la topografía de la zona, por lo que su empleo está restringido a determinadas localizaciones, quedando descartada en espacios extensos.

La energía eólica hace referencia a la energía cinética contenida en el viento, que depende fuertemente de la velocidad a la que se mueven las masas de aire. Se usan torres de distintas alturas y turbinas con aspas (aerogeneradores) de diversas potencias para transformar la energía eólica en energía mecánica y ésta finalmente en electricidad. Estos dispositivos están técnicamente muy desarrollados en la actualidad y hay países en el mundo que hacen de esta forma de generación eléctrica una alternativa viable y económicamente sustentable como una manera eficaz y no contaminante de incorporación a la matriz energética adoptada.

Existen actualmente condiciones que motivan la puesta en marcha de soluciones modernas con implementaciones tecnológicamente factibles para logara el objetivo principal de este proyecto, lo que puede expresarse según algunas consideraciones como:

- ✓ Acceso a modelos digitales globales de terreno y sus modelos derivados con niveles de precisión y exactitud altimétricas aceptables y suficientes para los fines de este trabajo.
- ✓ Posibilidad de contar con un mapa-criterio como la velocidad del viento y dirección , que es un dato crítico para

evaluar mapas de acogida optima de campos de viento

- ✓ Uso intensivo de cartografía digital en aplicaciones de consulta directa o vía WEB.
- ✓ Esta bastante probado la efectividad en diferentes aplicaciones a nivel mundial en diversos ámbitos, de la combinación de las tecnologías Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio para poder generar mapas de acogida del territorio para el emplazamiento de parques eólicos.
- ✓ Sistematización de varios procedimientos y cálculos de los distintos métodos geoestadisticos de localización en programas informáticos propietarios y libres.
- ✓ Acceso a un número importante de criterios y restricciones (mapas temáticos) que servirán de base para la Evaluación multicriterio en el objetivo de la creación de las mejores localizaciones de lugares óptimos para campos eólicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Debemos contar con los datos espaciales georreferenciados asociados a criterios y definidos como *factores y restricciones*. Los primeros como criterios que realzan o detractan la capacidad de asentamiento de una alternativa específica para la actividad en consideración (Eastman et al, 1993:2) y el segundo como criterio que restringe la disponibilidad de algunas alternativas según la actividad evaluada, es decir, se genera una capa binaria (1,0) en la cual un código representa las alternativas susceptibles de ser elegidas para la actividad, y otro, la no disponibilidad para la actividad.
Una vez conformada la geodatabase con los componentes espaciales (criterios) se someterán al procedimiento EMC, seleccionando los pesos por diversas maneras (subjetivos, asignados o calculados estadísticamente) con que intervendrán los datos, los algoritmos de normalización o estandarización (lineales, sigmoidales, exponenciales) y los métodos para las estrategias de decisión. Posteriormente se generaran los mapas de acogida óptima del territorio para la ubicación de los mejores lugares y la comparación entre ellos, para instalar un parque eólico
Podemos sintetizar la metodología según una secuencia de fases a saber:

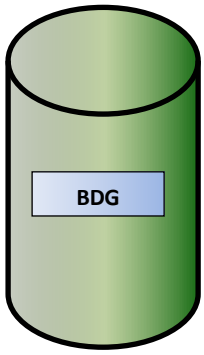
- Fase 0: Recopilación de antecedentes.
- Fase 1: Determinación de la zona de estudio.
- Fase 2: Diseño , selección y generación de los criterios y restricciones que conformaran la Geodatabase de análisis
- Fase 3: Procesados de los datos mediante la metodología EMC. Modelo Decisional
- Fase 4: Comparación de los resultados
- Fase 5: Validación de los resultados. Análisis de Sensibilidad Explícitamente Espacial
- Fase 6: Publicación en la WEB de los mapas síntesis de los modelos decisionales

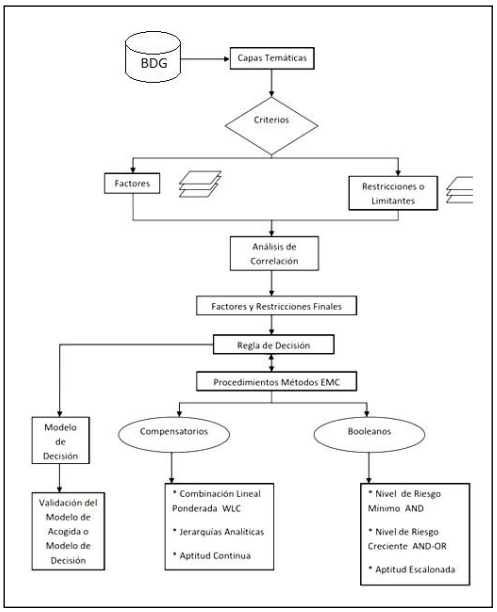
Elección de los criterios a utilizar

Para determinar la ubicación en base a la ejecución del Sistema de Información Territorial aplicando técnicas de Evaluación Multi-Criterio, de la instalación de campos eólicos, fue necesario consultar en bibliografía especializadas, casos reales de aplicación y con **expertos en el tema**, los cuales brindaron a su entender algunos requisitos mínimos (criterios) que debe cumplir la zona donde se debiera instalarse los generadores eólicos.

Teniendo en cuenta estos requerimientos, se procedió a definir las coberturas o capas que servirían de base para nuestro trabajo, las cuales son:

- Rutas y caminos
- Redes eléctricas
- Localidades
- Áreas protegidas
- Conos aluviales
- Embalses
- Ejidos Urbanos
- Ríos
- Mapa de pendientes
- Mapa de vientos
- Localidades
- Bosques Nativos
- Cuerpos de agua
- Valles
- Mapa de alturas





Una vez seleccionadas las coberturas con las que se iba a trabajar, se plantea un diagrama de flujo para sintetizar los procedimientos a seguir según el siguiente esquema.

Una vez que las capas temáticas correspondientes a los criterios han sido generadas, pueden ser combinadas a través de la regla de decisión para lograr la evaluación.

Tabla de factores y restricciones

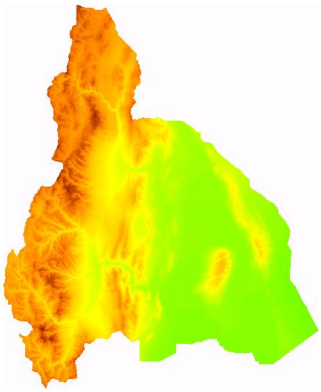
FACTORES	DISTANCIA DE AFECTACIÓN
• Rutas y caminos	A menos de 2 km
• Pendientes	A menos del 10% o 6°
• Redes eléctricas	A menos de 2 km
• Ríos	A más de 500m
• Vientos	A más de 3 m/s
• Localidades	A más de 500m
• Cabeceras	A más de 2 Km
• Alturas	A menos de 2500 mts

RESTRICCIONES	PUNTO DE CORTE
• Áreas protegidas	Dentro del área=0 Fuera del área=1
• Conos aluviales	Dentro del cono=0 Fuera del cono=1
• Embalses	Dentro del embalse=0 Fuera = 1
• Ejidos Urbanos	Dentro=0 Fuera=1
• Cuerpos de Agua	Dentro=0 Fuera=1
• Valles	Dentro del valle =0 Fuera=1
• Bosques Nativos	Dentro del área =0 Fuera=1

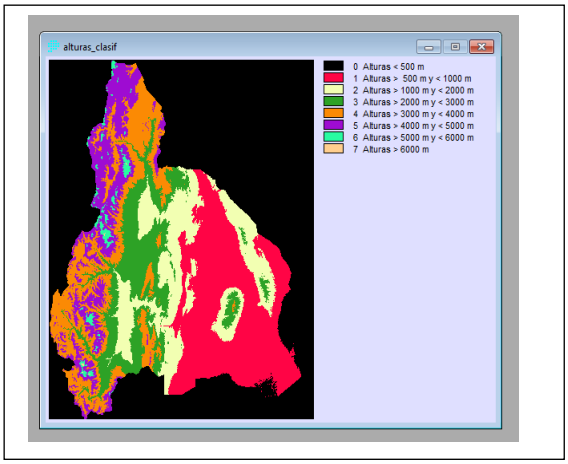
Se comentan a modo de ejemplo la generación de algunas de las 15 capas usadas y se describe más en detalle la generación del mapa de vientos como un factor de suma importancia en este tratamiento

Modelo Digital de Terreno (MDT)

El modelo digital del terreno utilizado, es el provisto por el proyecto de la NASA en la SRTM (Shutle Radar Topography Mission) con una resolución de 30 x 30 más. De él y a través de un tratamiento numérico pos proceso se obtuvieron los modelos de altura y pendiente, todos ajustados estrictamente a los límites de la provincia de San Juan, propuesto por la Dirección de Geodesia y Catastro de la provincia. Elaboración del CEFOCCA (Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro de la Fac. de Ing. Universidad Nacional de San Juan)



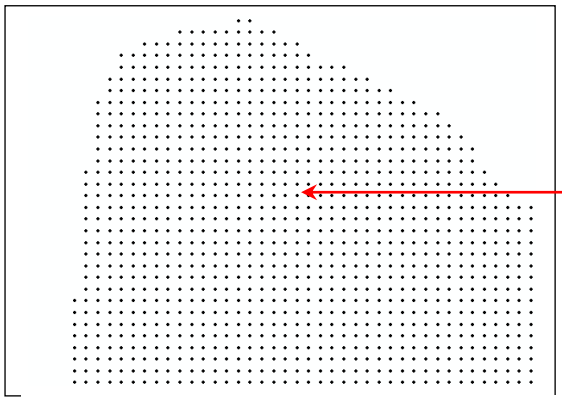
Modelo Digital de Terreno



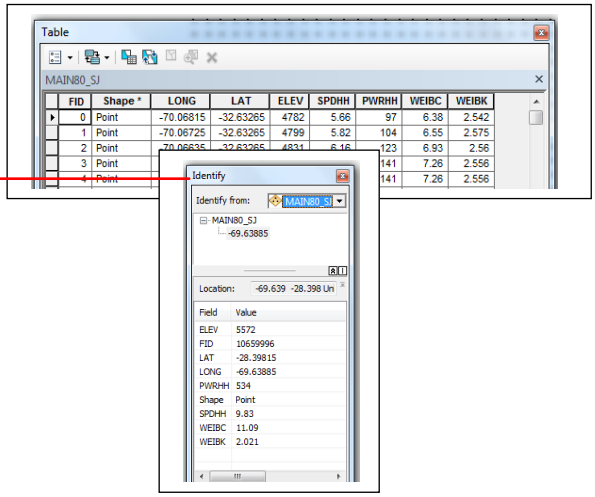
Modelo de Alturas

Mapa de Vientos

Esta capa de datos fundamentales para la generación de electricidad a través de la energía eólica se generó a partir de mediciones in-situ desde estaciones meteorológicas distribuidas en todo el espacio geográfico de la provincia, que median entre otras variables la **velocidad media del viento.** Mediante un modelo matemático de simulación se interpolaron estos datos de base y se generaron valores estimados de velocidad en cada nodo de una grilla de 100 x 100 metros, generando una capa vectorial de aproximadamente 11000000 de puntos. Datos provenientes del **EPSE** (Energía Eléctrica Sociedad del Estado) de San Juan



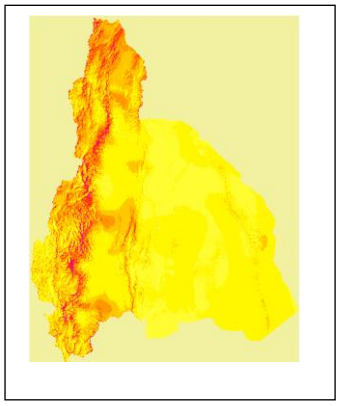
Capa de puntos interpolados de velocidad del viento



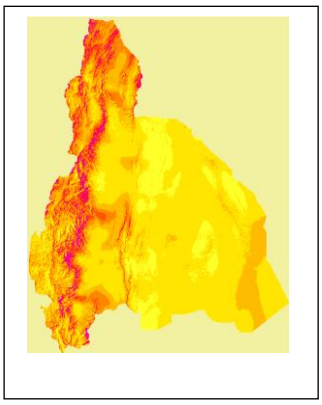
Atributos asociados a cada punto

Se puede apreciar con detalle que los atributos asociados a cada punto muestran datos como la posición geográfica en latitud (LAT)y longitud (LONG), la altura ortometrica de la medición (ELEV), **la velocidad del viento (SPDHH)**,el parámetro K de la distribución de la función de densidad de probabilidades de Weibull (WEIBK) y otros. Esto se da para una altura de medición de las variables de 50 ,80 y 100 mts. respecto del terreno, es decir que se cuenta con una capa de puntos para cada una de estas alturas.

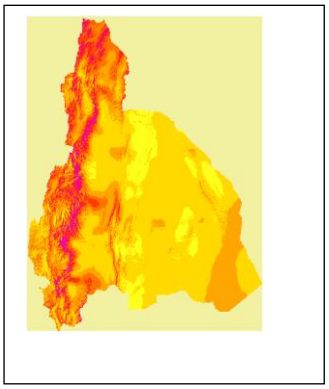
Para usar esta capa en el proceso EMC_GIS se pos procesaron la coberturas de puntos georreferenciándolas a un sistema de proyección cartográfico determinado (Gauss_Kruger faja2) y transformando el modelo de datos vectorial de puntos en un modelo raster de distribución continua sobre la variable velocidad del viento con un pixel de 100 x 100 m de resolución geométrica .Esto nos permitirá visualizar el territorio diferenciando intervalos continuos del atributo velocidad del viento en m/s.



Mapas de vientos a 50 m



Mapas de vientos a 80 m



Mapas de vientos a 100 m

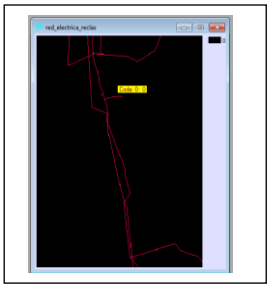
A partir de las imágenes así generadas, se contrastaron con la imagen dato que nos había provisto el EPSE, mediante un algoritmo de correlación como la regresión lineal para poder decir que los mapas de vientos alcanzados por nosotros y los provistos por el organismo estatal provincial son altamente parecidos, calculando y observando el coeficiente de correlación ***r*** a través de IDRISI por medio de la función REGRESS.

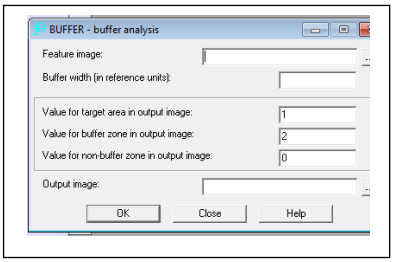
Se trataron las capas criterios para transformarlas en *factores y limitantes* mediante el programa raster *IDRISI Selva* antes de trabajar y operar con las reglas de decisión. Se comentará el procedimiento adecuado para resolver lo anterior para un caso de capas de carácter lineal o puntual y se entiende que el resto es una repetición de este proceso. Para el caso de capas de carácter poligonal se usó el procedimiento *reclass.* Las capas restricciones o limitantes son binarias *(0, 1). Por ej.*

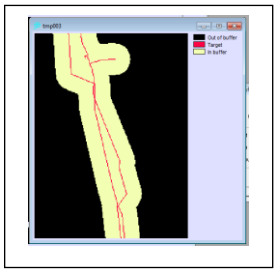
Redes eléctricas

Esta cobertura se extrajo del Atlas Digital Socio-Económico realizado por el CEFOCCA, la misma estaba en formato digital con extensión shape (SHP) y sistema de referencia POSGAR 1994 y con proyección cartográfica Gauss-Kruger Faja 2.:

Por último se debió trasformar esta cobertura en criterio, considerándola como factor, exigiéndole al sistema que las zonas elegidas se encuentren a nos mas de 2 kilómetros de un tendido eléctrico de alta o media tensión, por medio de la herramienta BUFFER







Análisis de correlación

Uno de los principios de EMC establece que el conjunto de factores a ser incluidos en el estudio debe ser completo (abarca todas las dimensiones del fenómenos estudiado); relevante; mínimo; y no redundante, es decir, que no resulta apropiado utilizar factores que estén aportando la misma información, ya que alguna dimensión del problema podría ser sobrevalorado si es que hay más de un factor que está valorando su adecuación.

Así, para evitar el problema de la redundancia, todos los factores deben ser sometidos a un análisis de correlación (cálculo del coeficiente de Pearson r) para encontrar cuales se encuentran espacialmente correlacionados (r>0.50), midiendo el mismo fenómeno. El análisis de correlación entre pares de factores, evalúa el grado de asociación entre los factores mediante el coeficiente de correlación de Pearson r

$$r = \frac{\sigma XY}{\sigma X \, \sigma Y} \qquad (1)$$

Dónde:

σXY =covarianza de (X, Y)

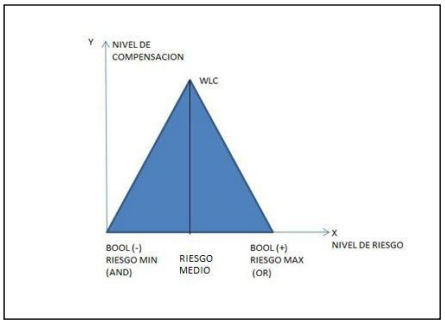
σX = Desviación típica en la variable X

σY = Desviación típica en la variable Y

El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1,1]

La gran mayoría de los valores de r es menor a 0.5, salvo uno en particular que supera ese valor de r (0.72) que indica que existe correlación entre las capas *altura* y *pendiente* .En rigor algunas de las dos capas debería eliminarse por ser redundantes, pero se decidió conservarla para el análisis. El resto de los criterios se comportan como linealmente independientes entre sí, razón por la cual, se decidió trabajar con los 15.

Interacción SIG y técnicas EMC



Triangulo de decisiones estratégicos (TDE)

La decisión locacional por medio de los SIG-EMC se mueve en una zona que puede ser graficada como un TDE formado por dos ejes ortogonales: X como un indicador de los niveles de riesgo en la toma de decisión locacional e Y como nivel de compensación a través de los valores de ponderación de los factores intervinientes en el análisis. Los métodos booleanos se mueven en el eje de las X desde el riesgo mínimo al riesgo máximo como una función escalonada y la WLC lo hace sobre el nivel de compensación Y como máxima eficacia y valor medio de riesgo.

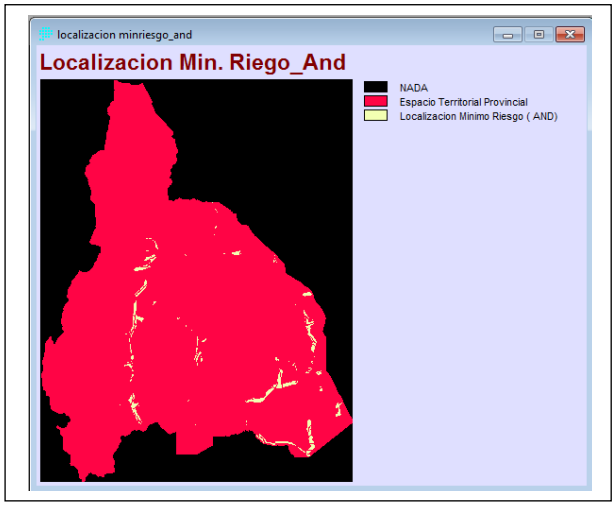
En nuestro trabajo se usaran los métodos de EMC booleanos y compensatorios aditivos por combinación lineal ponderada
Terminada la etapa de análisis de correlación, se está en condiciones de realizar los distintos modelos de aptitud locacionales, es decir, ya están los criterios trasformados en factores y restricciones, a los cuales se les puede aplicar ya las distintas técnicas de EMC para obtener los distintos modelos de aptitud. Para ello, se utilizaron 4 métodos:

- Booleano nivel de riesgo mínimo (AND)
- Booleano nivel de riesgo creciente (AND-OR)
- WLC con pesos distintos
- WLC con pesos iguales

Booleano nivel de riesgo mínimo (AND)

Una vez obtenido los criterios a utilizar, estandarizados los mismos con la técnica booleana (0 y 1), se procedió a obtener el modelo.

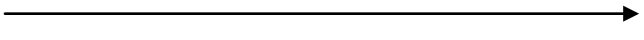
Como se explicó anteriormente, este método (AND) es el **producto** de todos los criterios utilizados (factores y restricciones). Debido a que los mismos están normalizados (0 y 1), el resultado de este producto serán zonas aptas y zonas no aptas (no aptas para el nivel 0 y aptas para el nivel 1).
Para lograr este mapa de aptitud se trabajó con la herramienta EMC-boolean intersección. Esta herramienta solicita ingresar solamente los criterios (factores y restricciones) intervinientes en el modelo.
El resultado de utilizar cualquiera de las dos herramientas mencionadas anteriormente es un mapa decisional de riesgo mínimo. En este se puede observar que el sistema determina las zonas con mayor aptitud locacional. Estas están perfectamente delimitadas y diferenciadas de las zonas que no tienen aptitud. Se observa que el sistema es tan estricto que solo muestra las zonas que cumplen con todos los criterios establecidos y las zonas que no cumplen, directamente no las considera, logrando así un modelo decisional con el mínimo riesgo de equivocación en la elección de las zonas aptas.



Localización min. riesgo

Booleano nivel de riesgo creciente (OR)

Método booleano por suma (OR-Nivel de riesgo creciente o escalonado

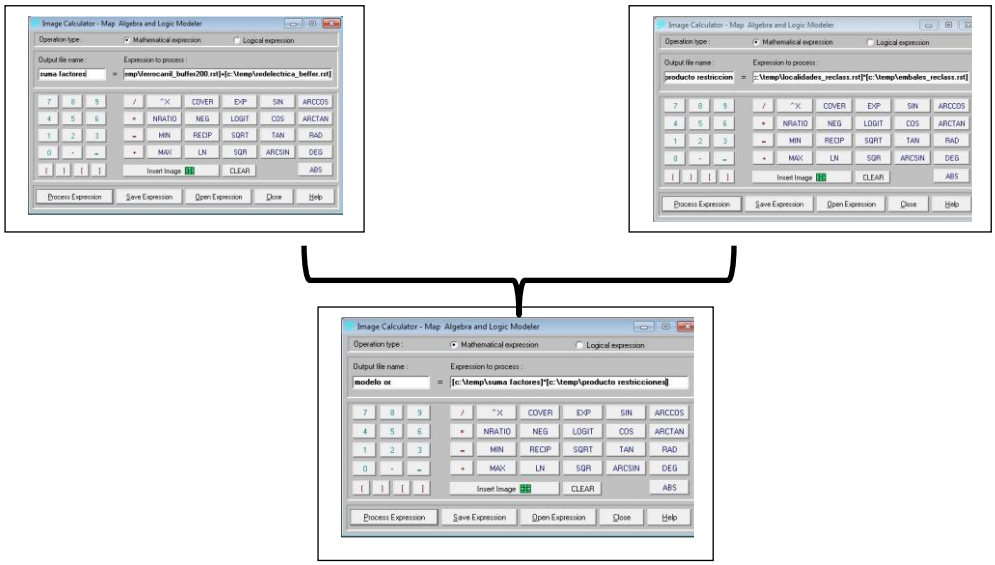


Nivel de riesgo — OR (X) nivel de riesgo máximo

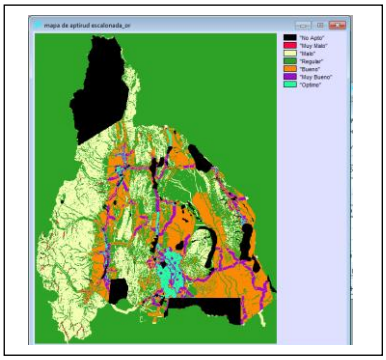
La intersección booleana a partir de la suma de matrices permite obtener una aptitud escalonada y progresiva en riesgo de tomar una decisión locacional.

Amplia la superficie de elección locacional al mismo tiempo que amplía la posibilidad de tomar una decisión incorrecta, mayor es la incertidumbre y el riesgo locacional que se corre en la decisión final.

Desde IDRISI



El resultado del procedimiento antes descripto es un mapa decisional de aptitud escalonada. Se observa que el mapa muestra zonas con la mejor aptitud y a medida que nos alejamos de dichas zonas la aptitud decrece, haciendo que el nivel de riesgo de equivocación en la localización de las zonas sea creciente.



Localización aptitud escalonada

Método de combinación lineal ponderada (WLC)

En el TDE (triangulo de decisiones estratégicas) la WLC lleva la solución al extremo superior como máxima compensación y riesgo medio de equivocarse en la decisión.

Triangulo de decisiones estratégicos (TDE)

Las técnicas compensatorias como la WLC, se basan en la suposición de que un valor alto de una alternativa (celda) en un criterio puede compensar un valor bajo en la misma alternativa (celda) en otro criterio.

$$r_i = \sum w_i x_{ij}$$

Dónde:

w_j es el peso de cada criterio

x_{ij} el valor de la celda en cada criterio

r_i el valor de la alternativa en el modelo de decisión

En los procedimientos aditivos, el valor obtenido por cada alternativa (celda) es el producto del peso del criterio y las puntuaciones del criterio siendo la alternativa que tenga **el valor más alto la más adecuada o la mejor para la actividad evaluada.**

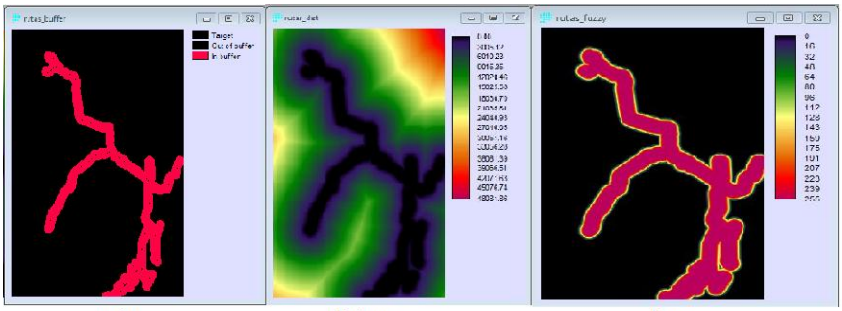
Como paso previo a la aplicación del método, es necesario generar una estandarización continua y difusa (fuzzy) de cada uno de los factores para obtener mapas comparables.

En las técnicas compensatorias como la WLC el valor de ponderación o peso (w_i) se puede asignar en forma simple a través de:

1. La experiencia del centro decisor
2. Un valor por conocimiento empírico
3. A través de metodologías numéricas como:
   - Rank reciprocal method (método por ranking reciproco) Malczewski
   - Analitical hierarchy process (método por jerarquías analíticas) Saaty

Para realizar la estandarización difusa, es necesario realizarle un análisis de distancia con la herramienta DISTANCE. Esta distancia responde a la geometría euclidiana.

Luego se procede a utilizar la herramienta FUZZY para estandarizar cada uno de los factores, analizando si las funciones son crecientes o decrecientes e ingresando los puntos de corte. Por ejemplo para el caso de *rutas*, la función es decreciente ya que a medida que nos alejamos de una ruta el nivel de aptitud es menor.



Buffer Distance Fuzzy

WLC con pesos distintos

Para la realización de este modelo, se debió primeramente calcular los pesos de cada factor a partir de asignarle a cada uno de ellos un nivel de importancia en base a la escala definida por Saaty.

Este nivel de importancia, debe ser establecido por el centro decisor. El mismo es muy subjetivo, porque está sujeto a la experiencia de cada uno de los integrantes del centro decisor. Por esta razón se trabajó para el cálculo de los pesos, con el comando WEIGHT de IDRISI, este calcula los pesos de la matriz de comparación y realiza un análisis estadístico de dichos pesos para saber si el nivel de jerarquías o importancia en la comparación por pares de factores fue bien tomado o no por parte del centro decisor. El resultado de este análisis estadístico es el radio de consistencia cr, que como ya se explico debe ser menor a 0.10.

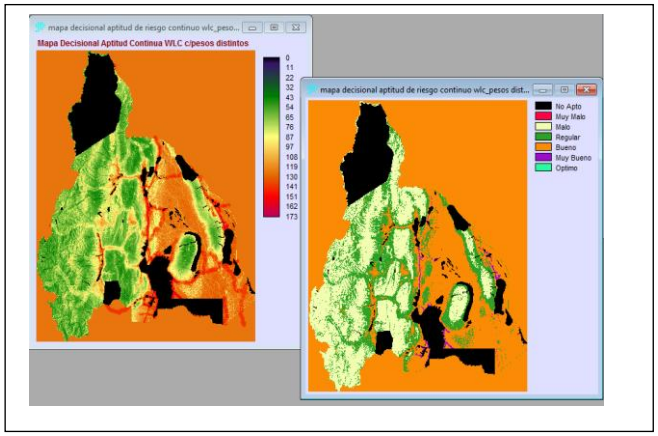
El radio de consistencia c.r. calculado es menor que 0.10, lo que indica que los pesos son correctos o es lo mismo decir que el nivel de jerarquías adoptado por el centro decisor para cada uno de los factores es óptima.

El conocimiento de los pesos también se puede alcanzar a través del cálculo del *eigen vector normalizado*, tal como se ve en la tabla adjunta. Los valores conseguidos por ambos procesos son totalmente coincidentes

						Calculo de los PESOS (Wi)				
	Matriz de Comparacion Normalizada (Aij)									
n	alturas	localidades	rutas	pendientes	cabeceras	rios	vientos	red elect.	Eigen Vector Ppal. (? aij)	Eigen Vector Normal. (Wj) (? ai
alturas	0.13	0.2	0.19	0.12	0.19	0.19	0.09	0.2	1.31	0.164
localidades	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.05	0.49	0.061
rutas	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.05	0.49	0.061
pendientes	0.13	0.13	0.19	0.12	0.19	0.19	0.09	0.2	1.24	0.155
cabeceras	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.05	0.49	0.061
rios	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.09	0.05	0.49	0.061

Tabla para el calculo del eigen vector Normal

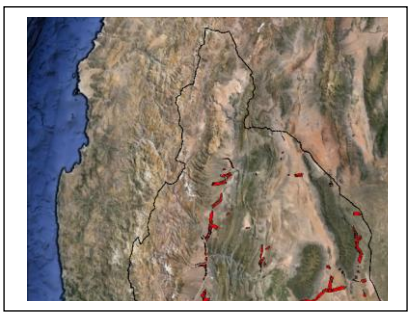
Considerando esta ponderación, se procedió a realizar el modelo decisional mediante el método de la combinación lineal ponderada, por medio de la herramienta WLC *weighted linear combination*.

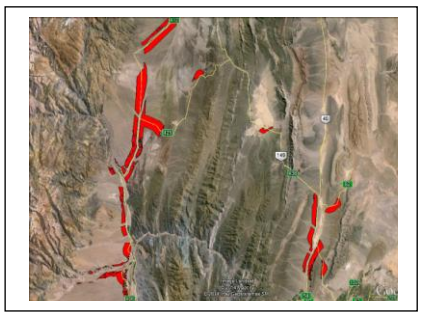


Mapas decisionales con método WLC

Este modelo muestra las zonas más aptas para la instalación de plantas de generación de energía eléctrica mediante energía eólica (“optimo” o valor de ND del pixel mayor 173), con un nivel de riesgo medio de cometer una equivocación en la elección de las zonas. A medida que nos alejamos de dichas zonas la probabilidad de equivocación aumenta.

Se observa una correlación muy alta entre los resultados aportados por los distintos métodos, sobre todo en las zonas denominadas *óptimas* que se las compara con las zonas booleanas del método de mínimo riesgo de elección.





Mapas decisionales minimo riesgo

DISCUSIÓN

Validación del análisis

Es de suma importancia contar con datos espaciales completos y **actuales** para poder operar sobre un modelo de la realidad que permita respuestas actuales y que puedan usarse en la toma de decisión y modificar así la realidad que nos rodea.

Esta etapa es muy importante debido a que en ella se contrasta lo obtenido a través de los distintos modelos decisionales en gabinete, con lo que sucede en la realidad. Es decir que a través de la validación se determina si la integración de las técnicas SIG y EMC son lo suficientemente confiables como para intervenir en un proceso de toma de decisión, como es la selección de lugares específicos.

Existen distintas formas de validar los resultados, con procedimientos estadísticos complejos como el *análisis de sensibilidad* y el *análisis de incertidumbre*, y otra forma es hacer la validación In-Situ, este último es el que adoptamos para validar los resultados.

La determinación de hacer la validación In-Situ se tomó, debido a que esta es la más efectiva porque se contrasta lo determinado por los modelos con la realidad (terreno, rutas, alturas, pendientes, cuerpos de agua, etc.) directamente con el mundo real.

Para una mejor localización de las zonas arrojas por el sistema, se extrajeron coordenadas aproximadas de cada una de ellas y con ayuda de un navegador de mano se rastrearon hasta llegar a las mismas, verificando in-situ el cumplimiento de las condiciones preestablecidas.

Cabe mencionar acá que se está trabajando actualmente en desarrollar la metodología (con alta carga informática) para definir la robustez de
los resultados a través de *análisis de sensibilidad*

CONCLUSIONES

Según lo experimentado hasta este momento en el desarrollo de este proyecto, podemos comentar con cierto nivel de certeza, que se han probado con acabada suficiencia los métodos y algoritmos propuestos por las técnicas GIS y EMC, probando que son excelentes herramientas para ejecutar modelos decisionales espaciales.

Se corroboró que las condiciones impuestas (criterios) como factores y restricciones son respetadas por el sistema, reproduciéndolas en el terreno, dando cierto grado de confianza en la selección de los lugares propuestos por la técnica SIG-EMC , como localizaciones óptimas para el emplazamiento de campos eólicos para generadores de energía eléctrica renovable.

Una vez situados en cada una de las zonas, se comprobó que éstas, cumplen acabadamente con todos los requisitos impuestos al iniciar el análisis.

BIBLIOGRAFIA

Barredo Cano, Jose I. ; Gomez Delgado Montserrat. 2008. Sistemas Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio.2da. Edicion. Editorial RA-MA. España.

Buzai, Gustavo; Baxendale Claudia 2012. Analisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica Tomo 2.Editorial Lugar. Buenos Aires.

Buzai, Gustavo; Baxendale Claudia; Cañada Torrecilla, Maria et al; Colsa Perez, Alejandro .2012. Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones en Diagnósticos Territoriales y Decisiones Geoambientales. Editorial RA-MA. España.

Buzai, Gustavo; Baxendale Claudia.2012. Analisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica Tomo1.Editorial Lugar. Buenos Aires.

W. Plata Rocha, Wenceslao; Gómez Delgado, Montserrat; Bosque Sendra, Joaquín; Aguilar Villegas, j. 2013. Análisis de Sensibilidad para un Modelo de Simulación de Crecimiento Urbano. Propuesta Metodológica Explícitamente Espacial.GeoFocus. Nº13-2, p.158-178. ISSN: 1578-5157.

EVIDENCIAS DE TELECONEXIÓN ENTRE EL ENOS Y LA FENOLOGÍA DE PASTIZALES TEMPLADOS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES UTILIZANDO SENSORES REMOTOS

Lara, Bruno (1, 2) y Gandini, Marcelo (1)

(1) Laboratorio de Investigación y Servicios en Teledetección de Azul (LISTA), Facultad de Agronomía, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA). brunolara73@gmail.com; mgandini@gmail.com

(2) Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la provincia de Buenos Aires.

RESUMEN

Diversos estudios demuestran las implicancias del evento El Niño Oscilación Sur (ENOS) sobre el funcionamiento de diferentes ecosistemas y en distintas latitudes. En este sentido, la utilización de sensores remotos ha permitido el estudio de la dinámica y distribución espacial de los ecosistemas a diferentes escalas espacio-temporales y, en particular, el NDVI es uno de los indicadores más utilizados ya que es un estimador lineal de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación y su mapeo permite describir los patrones regionales de productividad primaria neta. Los atributos fenológicos de los ecosistemas, descriptores de su funcionamiento, poseen la ventaja de reflejar rápidamente la respuesta ante determinados disturbios tales como los provocados por los distintos estados del ENOS. El objetivo del presente trabajo fue analizar la respuesta fenológica de los ecosistemas debido a la variabilidad climática producida por El Niño Oscilación Sur (ENOS) en la región de los pastizales templados de la provincia de Buenos Aires. Se utilizó una serie temporal de 14 años de NDVI-MODIS, desde julio de 2000 a junio de 2014 (producto MOD13Q1; escena h13v12). Esta serie se ajustó utilizando el filtro de Savitsky-Golay, ponderando cada uno de los pixeles a partir de la información provista por la banda de confiabilidad. A partir del ajuste se obtuvieron los descriptores del funcionamiento de los ecosistemas tales como el inicio de la estación de crecimiento, la duración estacional, la integral anual del NDVI (estimador de la productividad) y el momento de máximo NDVI (mayor actividad fotosintética). Para identificar los estados ENOS, se utilizó el promedio del trimestre invernal (julio-agosto-septiembre) del MEI (Multivariate ENSO Index). La respuesta de los ecosistemas producto de la variación climática debido al ENOS, se evaluó mediante análisis de regresión lineal entre cada uno de los atributos fenológicos y el MEI. Se encontró una relación positiva y negativa en la región entre la duración de la estación de crecimiento y el MEI, los patrones relacionados a una duración más larga (correlación positiva con el MEI) se observan en el centro de la región, mientras que los patrones asociados a una duración más corta (correlación negativa con el MEI) se observan en el SO y NE. El inicio de la estación de crecimiento no mostró una fuerte correlación con el MEI. La integral anual del NDVI presentó un patrón similar a la duración de la estación de crecimiento; el momento de máximo NDVI se asocia positivamente al MEI en zonas donde predominan pastizales naturales, y negativamente en zonas agrícolas. Estos resultados demuestran la importancia de los fenómenos de teleconexión, brindando elementos fundamentales a la hora de predecir cambios que sirvan de base para una planificación sustentable a escala regional en un contexto de baja previsibilidad climática.

Palabras clave: ENOS – NDVI – Dinámica – Fenología – Pastizales templados – Variabilidad - Teleconexión.

ABSTRACT

Numerous studies show the implications of El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the functioning of different ecosystems at different latitudes. In this sense, the use of remote sensing has allowed the study of the dynamic and spatial distribution of ecosystems at different spatial and temporal scales and particularly, NDVI is one the most used indicators because it is a linear estimator of the fraction of photosynthetically active radiation intercepted by vegetation and his mapping allow to describe regional pattern of net primary productivity. The phenological attributes of ecosystem (descriptors of his functioning) have the advantage of quickly responding to reflect disturbances such as

those caused by the different ENSO-phases. The aim of this study was to analyze the phenological response of ecosystems due to climate variability caused by El Niño Southern Oscillation (ENSO) in the region of the temperate grassland on the Buenos Aires province. A 14 years NDVI-MODIS time series from July 2000 to June 2014 was used (product MOD13Q1; h12v12 scene). This series was fitted using the Savitsky-Golay filter, weighting each of the pixels from the information provided by the pixel reliability band. From fitting, descriptors of ecosystem functioning such as the start of the growing season, the length of the growing season, the annual integral of NDVI and the time of maximum NDVI were obtained. To identify ENSO-phases, medium value for the winter season of MEI (Multivariate ENSO Index) was used. The response of ecosystems was assessed using linear regression analysis between the phenological attributes and MEI. Positive and negative relationship in the region between the length of the growing season and MEI were found, patterns related to a longer length (positive correlation with MEI) were observed in the center of the region, while patterns related to a shorter length (negative correlation with MEI) were found in the SW and NE. The start of the growing season showed no correlation with MEI. The annual integral of NDVI presented at similar pattern that length of the growing season; the time of maximum NDVI was positively associated with MEI on grassland and negatively on agricultural regions. These results demonstrate the importance of the teleconnection phenomena, providing fundamental elements for a sustainable regional planning in a context of low climate predictability.

Keywords: ENSO – NDVI – Dynamic – Phenolgy – Temperate Grassland – Variability – Teleconnection.

INTRODUCCIÓN

El Niño Oscilación Sur (ENOS) es el fenómeno acoplado océano-atmósfera más importante causante de variabilidad climática mundial a escalas de tiempo interanuales (Wolter y Timlin, 2011). Sobre Sudamérica, por lo general la fase fría del ENOS (conocida como “La Niña”) está asociada a eventos de sequía, mientras que la fase cálida (conocida como “El Niño”) se relaciona con precipitaciones por encima de lo normal (Allan et al., 1996). Se han observado las implicancias del ENOS sobre el funcionamiento de diferentes ecosistemas y en distintas regiones del mundo (Weiss et al., 2004; Schmidt et al., 2010; van Leeuwen et al., 2013; Broich et al., 2014), lo que puede provocar variaciones en los patrones de productividad que suelen conectarse en cascada a través de la red trófica provocando retroalimentaciones imprevistas.

El *Multivariate ENSO Index* (MEI) es utilizado como un indicador de las condiciones ENOS y está basado en 6 variables principalmente observadas sobre el Pacífico Tropical: presión a nivel del mar, componentes zonales y meridionales del viento superficial, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire y la fracción total de nubosidad del cielo. De esta manera, el MEI brinda una descripción más completa y flexible del fenómeno climático que otros índices comúnmente utilizados como el SOI o NIÑO 3.4 SST. El MEI es calculado como el primer componente principal no rotado de la combinación de las 6 variables analizadas, donde valores negativos están asociados con la fase de “La Niña” y valores positivos con “El Niño” (Wolter y Timlin, 2011). Si bien existen estudios que resaltan la importancia de este fenómeno climático en los mecanismos biológicos y ecológicos en diferentes partes del mundo, poco se conoce aún cómo actúa sobre los pastizales templados de la provincia de Buenos Aires (Argentina).

Por otro lado, la utilización de sensores remotos ha permitido el estudio de la dinámica y distribución espacial de los ecosistemas a diferentes escalas espacio-temporales, y ha sido tradicionalmente asociada a las descripciones de tipos de cobertura del suelo, caracterizando la heterogeneidad del paisaje y su patrón espacial (Cabello y Paruelo, 2008; Paruelo, 2008). Sin embargo, brinda la capacidad de obtener y describir diferentes aspectos funcionales de los ecosistemas (Alcaraz-Segura et al., 2009) y, en particular, el NDVI es uno de los indicadores más utilizados ya que es un estimador lineal de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fAPAR) y su mapeo permite describir los patrones regionales de productividad primaria neta (Pettorelli et al., 2005; Alcaraz-Segura et al., 2009). El análisis de los atributos fenológicos de los ecosistemas (descriptores de su funcionamiento) a partir de series temporales de NDVI involucra diferentes aspectos del intercambio de materia y energía entre la biota y la atmósfera (Paruelo et al., 2001; Alcaraz-Segura et al., 2009), al mismo tiempo que presentan la ventaja de ofrecer una rápida respuesta ante disturbios naturales o antrópicos.

En este contexto, el conocimiento de la dinámica en algunos atributos fenológicos primordiales se convierte en un elemento fundamental para mejorar los modelos climáticos actuales con el objetivo de que sean capaces de capturar la variabilidad interanual de la dinámica de la vegetación provocada por el ENOS, al mismo tiempo que la capacidad para predecir los efectos de las diferentes fases del ENOS puede ser utilizada para mejorar las estrategias de manejo en las regiones productivas asegurando una planificación sustentable en un contexto actual de baja previsibilidad climática.
La región de los pastizales templados de la provincia de Buenos Aires constituye un paisaje dinámico donde a las subunidades naturales se les superpone un mosaico de usos del suelo que cambian a lo largo del tiempo y, en mayor o menor medida, estos cambios son influenciados por las condiciones climáticas del ambiente (Viglizzo et al., 2001). De esta manera, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la respuesta de atributos fenológicos de los ecosistemas debido a la variabilidad climática producida por El Niño Oscilación Sur (ENOS) en la región de los pastizales templados de la provincia de Buenos Aires.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de atributos fenológicos

Se utilizó una serie temporal de imágenes de NDVI para el período julio de 2000 (día juliano 177) a junio de 2014 (día juliano 166) provenientes del producto MOD13Q1 (escena h13v12). Este producto, con una resolución espacial de 250 m, integra composiciones de 16 días de NDVI utilizando diferentes métodos de procesamiento lo que depende del número y calidad de las observaciones (Didan y Huete, 2006).
La serie temporal de NDVI se ajustó pixel a pixel utilizando el filtro de Savitsky-Golay (1) el cual se basa en ajustes polinómicos locales.

$$\sum_{j=-n}^{n} c_j y_i +_j \qquad (1)$$

Donde cada valor $y_{i,}\ i = 1,...,N$ es reemplazado por una combinación linear de valores próximos en una ventana (definida por el usuario). Para cada dato, el siguiente polinomio cuadrático:

$$f(t) = c_1 + c_2 t + c_3 t^2 \qquad (2)$$

es ajustado a todos los 2n + 1 puntos en la ventana móvil y el valor y_i es reemplazado por el valor del polinomio en la posición t_i. Teniendo en cuenta que el ruido en el NDVI está sesgado negativamente, el resultado de la aplicación del filtro es una curva suavizada adaptada a los valores de la porción superior de la serie de tiempo, manteniendo máximos y mínimos relativos (Jönsson y Eklundh, 2004). Además, se ponderaron cada uno de los pixeles a partir de la información provista por la banda de confiabilidad (pixel reliability; MOD13Q1): a los valores 0 (buen dato) se dio un peso de 1, a los valores 1 y 2 (datos marginales, nieve o hielo) un peso de 0,5 y a los valores 3 (cobertura nubosa) un peso mínimo de 0,1.
Luego de realizado el filtrado de los datos originales se obtuvieron los atributos fenológicos para cada estación de crecimiento en el período 2000-2014, tales como el comienzo de la estación de crecimiento (CEC), la duración de la estación de crecimiento (DEC), la integral anual del NDVI (i-NDVI) y el momento del máximo NDVI (t-MAX) (Tabla 1). Estos atributos tienen un significado ecológico y son importantes para el monitoreo del funcionamiento de los ecosistemas (Pettorelli et al., 2005; Alcaraz-Segura et al., 2009).

Tabla 1. Significado ecológico de los atributos obtenidos a partir de las series temporales de NDVI (modificado de Pettorelli et al., 2005).

Atributo fenológico	Significado ecológico
Comienzo de la estación de crecimiento (CEC)	Relacionado al comienzo de la actividad fotosintética del ecosistema.
Duración de la estación de crecimiento (DEC)	Relacionado con la variación intra-anual de la intercepción de la luz y el flujo de carbono. Además, cantidad de días donde el alimento está disponible.
Integral anual de NDVI (i-NDVI)	Estimador de la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fAPAR) y, por ende, de la productividad primaria neta (PPN).
Momento del máximo NDVI (t-MAX)	Período de máxima actividad fotosintética del ecosistema y/o de máxima disponibilidad de vegetación.

Identificación de las diferentes fases del ENOS

Se utilizó el promedio del trimestre invernal (julio-agosto-septiembre) del índice multivariado del ENOS (MEI, *Multivariate ENSO Index*) debido a que representa múltiples variables y brinda una descripción más completa que otros índices comúnmente utilizados (Wolter y Timlin, 2011). Para mantener los valores del índice comparables a lo largo del tiempo, todos los valores estacionales son estandarizados con lo cual valores negativos están asociados con la fase ENOS de “La Niña” (fase fría) y valores positivos asociados a la fase de “El Niño” (fase cálida). Los datos fueron obtenidos del sitio web del Earth System Research Laboratory de la NOAA (http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/index.html). En la Figura 1 se muestran los valores promedio del trimestre invernal para cada una de las estaciones de crecimiento analizadas en este trabajo.

Teniendo en cuenta que la variabilidad climática es una de las causas principales en la variabilidad de la respuesta de distintos ecosistemas, se analizó la relación entre los diferentes atributos fenológicos obtenidos a partir de la serie temporal de imágenes de NDVI (descriptores del funcionamiento de los ecosistemas) y el MEI (del trimestre invernal), mediante la utilización de un análisis de regresión lineal. La siguiente ecuación (3) muestra la relación entre los atributos fenológicos y el MEI:

$$Atr\ Fen = a * MEI + b + e \qquad (3)$$

Donde a y b son la pendiente y la ordenada al origen, respectivamente; e hace referencia al término del error de la solución de cuadrados mínimos y $Atr\ Fen$ representa cada uno de los atributos fenológicos (CEC, DEC, i-NDVI, t-MAX). Se estableció para el análisis un alfa de 0,05 donde pixeles con un p-valor menor a 0,05 fueron considerados significativos.

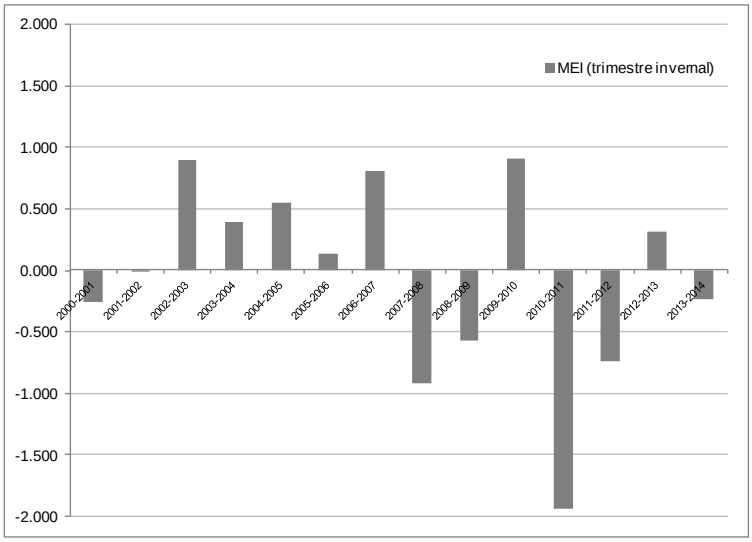


Figura 1. Evolución del promedio del trimestre invernal (julio-agosto-septiembre) del MEI (Multivariate ENSO Index) para las estaciones de crecimiento desde 2000-2001 a 2013-2014. Valores negativos están asociados con la fase de “La Niña” y valores positivos a la fase de “El Niño”.

RESULTADOS

Las respuestas fenológica de los ecosistemas debido a la variabilidad climática producida por el ENOS se muestran en la Figura 2, 3, 4 y 5. El promedio del trimestre invernal del MEI se correlaciona tanto positiva como negativamente con la duración de la estación de crecimiento (DEC) en la región, lo que está indicando una estación de crecimiento más extensa y más acotada, respectivamente. El patrón espacial más intenso se asocia a una DEC más larga (es decir, correlación positiva con el trimestre invernal del MEI), observándose en una franja central que cubre prácticamente toda la extensión de oeste a este excepto la región de influencia de la Bahía de Samborombón. Además, se aprecian patrones algo más aislados asociados a una DEC más corta (es decir, correlación negativa con el trimestre invernal del MEI) en el Sur, SO y NE de la región analizada (Figura 2). Con respecto a los efectos del ENOS sobre el comienzo de la estación de crecimiento (CEC), no se encontró un fuerte patrón de correlación espacial (Figura 3).

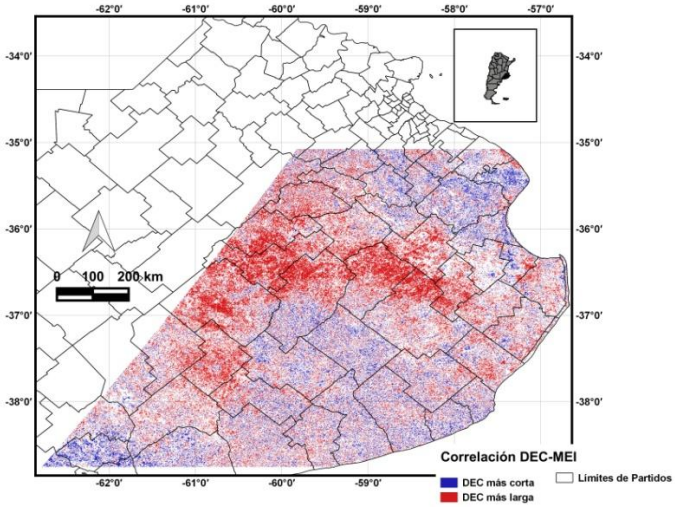


Figura 2. Patrones de correlación significativa entre la duración de estación de crecimiento (DEC) y el MEI para el período 2000-2014.

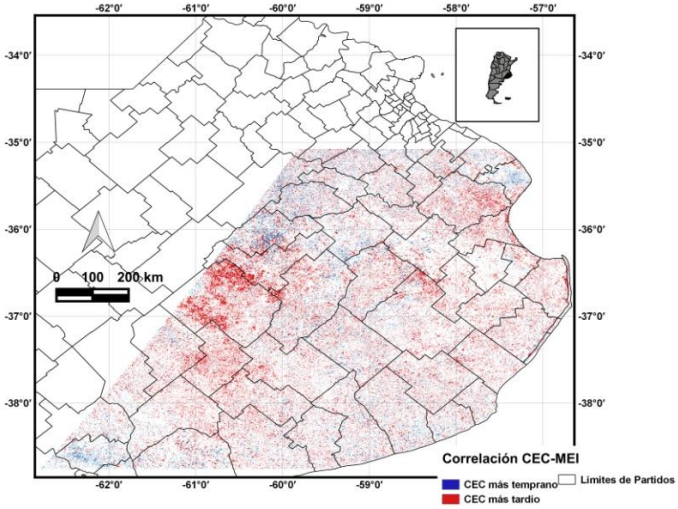


Figura 3. Patrones de correlación significativa entre el comienzo de la estación de crecimiento (CEC) y el MEI para el período 2000-2014.

La integral anual del NDVI (i-NDVI), estimador de la productividad primaria neta, presenta un patrón de correlación espacial con el MEI similar al que presenta la duración de la estación de crecimiento: correlaciones positivas ($p<0,05$) coincidentes con el sector centro-oeste de la Pampa Deprimida (Matteucci, 2012) y patrones relacionados a una disminución en la productividad (correlaciones negativas con el MEI) en los sectores Sur, SO y NE (Figura 4).

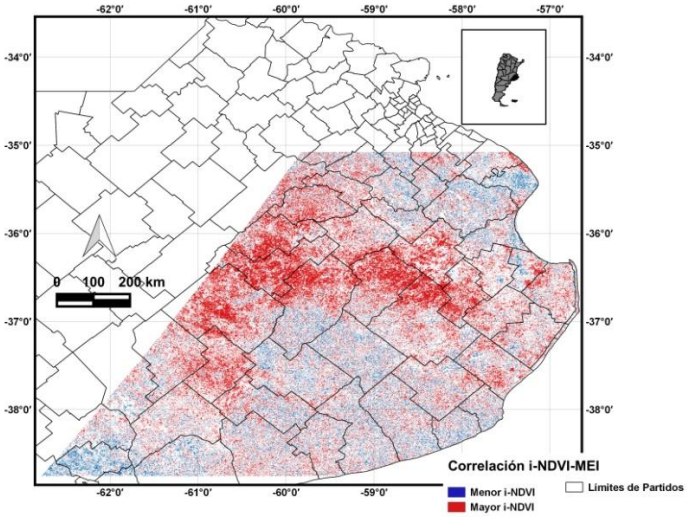


Figura 4. Patrones de correlación significativa entre la integral anual del NDVI (i-NDVI) y el MEI para el período 2000-2014.

Por otro lado, con respecto al momento del máximo NDVI (t-MAX, período de mayor actividad fotosintética del ecosistema), el MEI presenta correlaciones negativas y positivas en el área de estudio. Los patrones espaciales más representativos de correlación positiva con el MEI, es decir que están asociados a un t-MAX más tardío, se encuentran en el sector centro-oeste del área de estudio (Figura 5).

Sin embargo, se aprecia también un patrón de correlación positiva significativa ($p<0,05$) en el extremo NE, aunque algo más aislado. El patrón asociado a un pico de actividad fotosintética más temprano, es decir de correlación negativa con el MEI, es más disperso y se localiza en el sector Sur de la región (Figura 5), sobre las sierras bonaerenses del Sistema de Tandilia y la Pampa Interserrana (Matteucci, 2012).

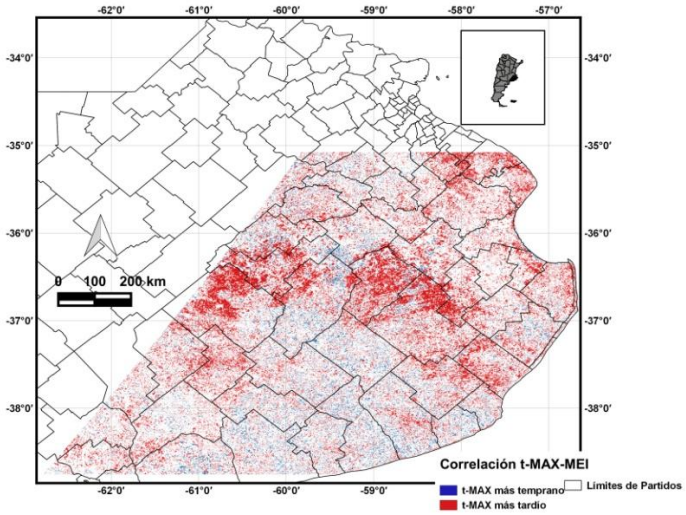


Figura 5. Patrones de correlación significativa entre el momento del máximo NDVI (t-MAX) y el MEI para el período 2000-2014.

DISCUSIÓN

Los atributos fenológicos de los ecosistemas responden, probablemente a los patrones de variación en la temperatura, radiación y humedad o a una combinación compleja de estos factores. Los resultados muestran que en determinadas áreas de la provincia de Buenos Aires los atributos fenológicos responden fuertemente a la variabilidad climática producida por El Niño Oscilación Sur (ENOS) y, además, estas respuestas varían regionalmente entre los distintos ecosistemas a escala de paisaje. El promedio del trimestre invernal del MEI tuvo un impacto significativo en la duración de la estación de crecimiento con patrones espaciales diferentes. Un patrón espacial de correlación positiva (asociado a una duración de la estación de crecimiento más extensa) se ubica cubriendo una franja central de oeste a este, a excepción del sector costero, el cual es un área que se caracteriza por la presencia de un alto porcentaje de cobertura de pastizales naturales (Lara y Gandini, 2014) que se disponen en un mosaico complejo característico de la Pampa Deprimida (Matteucci, 2012). Los patrones asociados a una duración de la estación de crecimiento más corta, es decir donde se evidenció una correlación negativa con el MEI, se encuentran en el Sur, SO y NE de la región, en sectores donde la principal actividad productiva es agrícola y la mayor parte de los pastizales naturales han sido reemplazados como ocurrió en la Pampa Ondulada y en gran parte de la Pampa Austral (Baldi et al., 2006; Matteucci, 2012). A pesar del efecto diferencial del ENOS sobre la duración de la estación de crecimiento, no tuvo un impacto significativo en el momento del inicio de la estación de crecimiento, ni asociado a un retraso o a un adelanto del mismo como ha sido encontrado productividad del ecosistema, mostró un patrón de respuesta al trimestre invernal del MEI prácticamente idéntico al de la duración de la estación de crecimiento. Los pastizales naturales de la Pampa Deprimida parecen responder rápidamente al incremento en las

precipitaciones relacionadas con los valores más altos del MEI o fase de “El Niño” (Allan et al., 1996), lo que también ha sido observado sobre pastizales y sabanas de Australia (Schmidt et al., 2010). Por otro lado, el incremento en las precipitaciones estaría afectando las áreas agrícolas de la región, probablemente, por efecto de anegamientos prolongados. Estos resultados refuerzan lo encontrado por Insausti et al. (2005) en la Pampa Deprimida a otra escala de análisis, donde las inundaciones son eventos frecuentes y permiten el re-establecimiento de distintas especies características del pastizal natural, en detrimento de especies exóticas, aumentando la productividad primaria neta y recuperando su fisonomía autóctona.

Con respecto al momento de mayor actividad fotosintética, momento de máximo NDVI (t-MAX), el patrón de correlación positivo más intenso con el MEI se da sobre el sector centro-oeste de la Pampa Deprimida donde predominan las zonas de pastizales naturales que parecen responder al incremento de las precipitaciones provocadas por la fase cálida del ENOS (valores más altos del MEI); mientras que en el sector sur donde predominan las actividades agrícolas, se encontró que el aporte de las precipitaciones por encima de lo normal provocaría que el pico de actividad fotosintética ocurra antes (correlación negativa con el MEI), lo que ha sido observado por otros autores (Paruelo y Sala, 1993; Broich et al., 2010).

El conocimiento del impacto de la variabilidad climática producida por el ENOS en los diferentes atributos fenológicos analizados en este trabajo, descriptores esenciales del funcionamiento de los ecosistemas, debería ser un insumo imprescindible que sirva para la mejora de los modelos climáticos actuales y que éstos permitan capturar la variabilidad interanual de la dinámica de la vegetación a escala regional debido a variaciones en los patrones de precipitación influenciados por el ENOS. En este mismo sentido, sería deseable que la capacidad para predecir los efectos del ENOS en los patrones regionales de productividad pueda ser utilizada como soporte en la toma de decisiones y mejorar las estrategias de manejo de los recursos naturales de la región bajo una planificación sustentable a largo plazo, ya que, por ejemplo, en el sector más productivo se ha evidenciado a escala regional una tendencia negativa de la productividad primaria neta (Lara y Gandini, 2015).

CONCLUSIONES

El análisis de series temporales de imágenes de NDVI, conjuntamente con la aplicación de funciones de filtrado de datos, resultaron una poderosa herramienta que nos permitió evaluar la variabilidad en la respuesta de los atributos funcionales de los ecosistemas en la región de los pastizales templados de la provincia de Buenos Aires, un paisaje altamente dinámico y considerado uno de los más productivos del país, frente al fenómeno climático más importante responsable de la variabilidad climática interanual.

El promedio del trimestre invernal del MEI (Multivariate ENSO Index) permitió explicar la variabilidad interanual en los atributos fenológicos, excepto el comienzo de la estación de crecimiento, en algunas regiones de los pastizales templados de la provincia de Buenos Aires. Los valores más altos del MEI, relacionados a la fase de “El Niño” y por ende a un aumento por encima de lo normal en las precipitaciones, presentaron correlación significativa con la duración de la estación de crecimiento, el momento de máximo NDVI y la integral anual del NDVI, aunque este impacto varió espacialmente. En general, en los sectores donde aún predominan coberturas de pastizales naturales se observaron patrones de correlación positiva para los atributos antes mencionados, mientras que en las regiones donde predominan los cultivos, prevaleció un patrón de correlación negativa, donde el aumento en las precipitaciones estaría afectando la duración de la estación de crecimiento y la productividad (estimada a partir de la integral del NDVI). Gran parte de los patrones de correlación significativa entre el MEI y la duración de la estación de crecimiento y la integral anual del NDVI reflejan las divisiones en sub-regiones ecológicas realizadas por diversos autores y que, en cierta medida, coinciden con los patrones de variabilidad climática a mayor escala. La incorporación de datos a una resolución de más detalle podrían ser útiles donde las prácticas de uso del suelo son muy heterogéneas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires y a la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la UNCPBA por el apoyo en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaraz-Segura, D., Cabello, J., Paruelo, J. M. y Delibes, M. 2009. Use of descriptors of ecosystem functioning for monitoring a national park network: a remote sensing approach. Environmental Management, 43: 38-48.

Allan, R., Lindesay, J. and Parker, D., editors. 1996. El Niño Southern Oscillation and Climatic Variability. Australia: CSIRO.

Baldi, G., Guerschman, J. and Paruelo, J. M. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. Agriculture, Ecosystems and Environment, 116: 197-208.

Broich, M., Huete, A., Tulbure, M., Ma, X., Xin, Q., Paget, M., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Devadas, R. and Held, A. 2014. Land surface phenological response to decadal climate variability across Australia using satellite remote sensing. Biogeosciences, 11: 5181-5198.

Cabello, J. y Paruelo, J. M. 2008. La teledetección en estudios ecológicos. Ecosistemas, 17(3): 1-3.

Didan, K. and Huete, A. 2006. MODIS vegetation index products series, collection 5, change summary. TBRS Lab., The University of Arizona.

Insausti, P., Chaneton, E. y Grimoldi, A. 2005. Las inundaciones modifican la estructura y dinámica de la vegetación en los pastizales de la Pampa Deprimida. Pp. 253-269 en Oesterheld, M; Aguiar, MR; Ghersa, CM; Paruelo, JM, editores. La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando León. Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires.

Jönsson, P. and Eklundh, L. 2004. Timesat – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. Computers & Geosciences, 30: 833-845.

Lara, B. and Gandini, M. 2014. Quantifying the land cover changes and fragmentation patterns in the Argentina Pampas, in the last 37 years (1974-2011). GeoFocus (artículos), 14: 163-180.

Lara, B. y Gandini, M. 2015. Tendencias en la dinámica de la vegetación en un sector de la provincia de Buenos Aires a escala de paisaje: una aproximación utilizando series temporales de NDVI. Actas de V Jornadas y II Congreso Argentino de Ecología de Paisajes. Resumen completo: 139-141.

Matteucci, S. 2012. Ecorregión Pampa. Pp. 391-446 en Morello, J., S. Matteucci, A. Rodríguez y M. Silva, editores. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora.

Paruelo, J. M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. Ecosistemas, 17(3): 4-22.

Paruelo, J. M. and Sala, O. E. 1993. Effect of global change on maize production in the Argentinean Pampas. Climate Research, 3:161-167.

Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G. and Sala O. E. 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. Ecosystems, 4: 683-698.

Pettorelli, N., Vik, J., Mysterud, A., Gaillard, J., Tucker, C. and Stenseth, N. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Trends in Ecology and Evolution, 20(9): 503-510.

Schmidt, M., Raupach, M. and Briggs, P. 2010. Use of lagged time series correlations to relate climate drivers and vegetation response. In: Sparrow, B. and Bhalia, G. (eds.): Proceedings of the 15th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, pp. 1-14.

van Leeuwen, W., Hartfield, K., Miranda, M. and Meza, F.J. 2013. Trends an ENSO/AAO driven variability in NDVI derived productivity and phenology alongside the Andes Mountains. Remote Sensing, 5: 1177-1203.

Viglizzo, E., Lértora, F., Pordomingo, A., Bernardos, J., Roberto, Z. and Del Valle, H.. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. Agriculture, Ecosystems and Environment, 83: 65-81.

Weiss, J., Guztler, D., Coonrod, J. and Dahm, C. 2004. Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico, USA. Journal of Arid Environments, 57: 507-534.

Wolter, K. and Tomlin, M.S. 2011. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). International Journal of Climatology, 31: 1074-1087.